GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TAŞ DOLGU DALGAKIRANLAR İÇİN YENİLİKÇİ TEK SIRA KORUMA TABAKASI TASARIMI: PİBLOK+

Arif UĞURLU

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2024

Arif UĞURLU tarafından hazırlanan “TAŞ DOLGU DALGAKIRANLAR IÇIN YENILIKÇI TEK SIRA KORUMA TABAKASI TASARIMI: PIBLOK+” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Can Elmar BALAS

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak doktora tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

....

Başkan: Prof. Dr. Serhat KÜÇÜKALİ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak doktora tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

....

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Önder KOÇYİĞİT

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak doktora tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

....

Üye: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak doktora tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

....

Üye: Doç. Dr. Aslı NUMANOĞLU GENÇ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TED Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak doktora tezi olduğunu onaylıyorum.

....

Tez Savunma Tarihi: 30 /04/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin doktora tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Arif UĞURLU
30/04/2024

TAŞ DOLGU DALGAKIRANLAR İÇİN YENİLİKÇİ TEK SIRA KORUMA TABAKASI TASARIMI: PİBLOK+

(Doktora Tezi)

Arif UĞURLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2024

ÖZET

Bu çalışmada inşaatı zorlayıcı olan ve 20 m'den daha derin su kesimlerinde imal edilen kıyı yapılarının belirlenimci ve olasılıksal tasarımları karşılaştırmalı olarak incelenerek bu koşullarda seçilecek yapılar standartlar açısından irdelenmiştir. Literatüre katkı olarak, derin deniz kıyı yapıları için olasılıksal ve belirlenimci yöntemler içeren hibrid bir tasarım modeli olan DEKYAP geliştirilmiştir. Model sonuçları tüm derin deniz yapı alternatifleri için birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Teknolojiye katkı olarak, ülkemizin ilk ve tek yerli tek sıra koruma tabakası Piblok+ geliştirilerek 2022/018635 numaralı patent Türk Patent Enstitüsü'nden alınmıştır. Piblok+ numerik modeller ile eş değerleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak taş dolgu derin deniz yapıları ele alınmış ve mevzuatta yer alan düzenlemeler çerçevesinde irdelenmiştir. Daha sonra bu tahkikler Monte Carlo Simülasyonu (MCS) yöntemi ile olasılıksal tasarım için yinelenmiş ve iklim değişikliğinin etkileri gözetilerek standartlar için öneriler geliştirilmiştir. Böylece standartlarda bu koşullarda tasarlanacak kıyı yapıları için öneriler ekonomik analizler çerçevesinde geliştirilmiştir. Bölgenin dalga ve rüzgâr iklimi, ülkemizde geliştirilen HYDROTAM-3D yazılımı ile belirlenmiştir. Eş zamanlı olarak ülkemizin ilk ve tek yerli tek sıra koruma tabakası Piblok+'ın patent başvuruları tamamlanmıştır. Piblok+ tek sıra koruma tabakasının Rize-Artvin Havalimanı projesinde kullanılması durumunda, bölgedeki dalgalar etkisindeki hidrolik davranışı HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ile modellenmiştir. HAD modelleme için FLOW-3D yazılımı kullanılmıştır. Derin kıyı yapıları için Rize-Artvin Havalimanı örneğinde, deneyleri daha önce yapılmış olan Accropode II ile Piblok+ alternatifleri belirlenimci, güvenirliğe dayalı olasılıksal ve sayısal yöntemlerle ekonomik analiz çerçevesinde karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve iklim değişikliğine bağlı su seviyesi artışlarının tasarımda büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Standartlarda iklim değişikliğini en iyi yansıtan güvenirliğe dayalı modelin kullanılması gerektiği ortaya konmuştur. Piblok'un patent süreci olumlu sonuçlanmış, "Sönümleyici Tek Kat Koruma Tabakası TPE: 2023/007643" patent numarası ile ilk patent alınmıştır. Piblok+ ikinci aşama çalışmanın sonucu olup Piblok'a oranla daha başarılı kilitlenme kapasitesine sahiptir. Tez kapsamında HAD çalışmaları yapılan Piblok+ benzeri tek sıra koruma tabakaları ile karşılaştırıldığında (Accropode II) aşma, stabilite ve ekonomi yönünden başarılı sonuçlar vermiştir. Piblok+'ın üç boyutlu yazıcıda basılan modelleri Ek 2 Ek-2. Şekil'da görülmektedir. Daha gelişmiş bir ürün olan Piblok+ patent başvurusu TPE nezdinde 2022/018635 başvuru numarası ile yapılmış ve 29.01.2024 tarihinde ikinci patenti alması TPE tarafından uygun görülmüştür. 21.02.2024 tarihinde resmi patent bülteninde yayınlanmıştır (Ek 2. Ek-2. Şekil). Sonuç olarak, karşılaştırılan derin kıyı yapıları alternatifleri içinde Piblok+ başarılı sonuçlar vermiş, prototip koşullarına uygulanabilecek seviyede bir tasarım olduğu ortaya konmuş ve hidrolik deney aşamasına geçilebilecek bir yatırım olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu	:	91117
Anahtar Kelimeler	:	Derin kıyı yapıları, güvenirlik, maliyet, stabilite, numerik model, hesaplamalı akışkan dinamiği
Sayfa Adedi	:	113
Danışman	:	Prof. Dr. Can Elmar BALAS

INNOVATIVE SINGLE-LAYER ARMOR UNIT DESIGN FOR RUBBLE MOUND BREAKWATERS: PIBLOK+

(Ph. D. Thesis)

Arif UĞURLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

ABSTRACT

In this thesis, the deterministic and probabilistic designs of sea structures designed in water depths exceeding 20 meters, which pose construction challenges, have been comparatively examined and assessed for compliance with standards under these conditions. As a contribution to the literature, DEKYAP, a hybrid design model incorporating probabilistic and deterministic methods for deep-sea structures, has been developed. The model results were compared across all deep-sea structure alternatives. As a technological contribution, Turkey's first and only single-layer protection system, Piblok+, was developed and patented by the Turkish Patent Institute with a number of 2022/018635. The numerical models of the new design were compared with its alternatives and solutions for these structures. Initially, deep-sea structures were considered and examined within the framework of the regulations in the study. Subsequently, these investigations were repeated for probabilistic design using the Monte Carlo Simulation (MCS) method, considering the effects of climate change, and suggestions were developed for standards. Thus, design suggestions for deep sea structures proposed under environmental conditions were developed within the framework of economic analyses. The wave and wind climate of the region was determined using the HYDROTAM-3D software developed in Türkiye. Concurrently, the patent applications for Türkiye's first and only single-layer protection layer, Piblok+, have been completed. If Piblok+ is used in the Rize-Artvin Airport project, the hydraulic behavior under Black Sea waves was modeled using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The FLOW-3D software was used for CFD modeling. As a result, in the example of the Rize-Artvin Airport, previously tested alternatives of Accropode II and Piblok+ were compared using deterministic, reliability-based probabilistic, and numerical methods within the framework of an economic analysis, and it was determined that increases in water levels due to climate change had a significant impact on the design. It has been determined that the reliability-based model that best reflects climate change should be used in standards. Piblok's patent process has been successfully completed, and the first patent has been obtained under the patent of "Single-Layer Armor Protection TPE: 2023/007643". The upgraded version Piblok+ is the result of the second phase of the study and has a higher locking capacity. Piblok+ is compared to similar single-row protection layers such as Accropode II for wave overtopping, stability, and economy, it has shown successful performance. Models of Piblok+ printed with a 3D printer are shown in Appendix 2, Figure 9.7. The second patent application for Piblok+ was submitted to TPE with the application number 2022/018635, and it was considered suitable by TPE to receive its second patent on 29.01.2024. It was published in the official patent bulletin on 21.02.2024 (Appendix 2, Figure 9.8). As a result, among the compared deep coastal structure alternatives, Piblok+ has yielded successful results, proven to be a design that can be applied at prototype conditions, and has reached the conclusion that it would be a viable investment to move to the hydraulic testing phase.

Science Code	:	91117
Key Words	:	Deep-sea structures, reliability, cost, stability, numerical modeling, computational fluid dynamics
Page Number	:	113
Supervisor	:	Prof. Dr. Can Elmar BALAS

TEŞEKKÜR

İlk olarak bu tezin gerçeğe dönüşmesini sağlayan hocam, ağabeyim, değerli büyüğüm Prof. Dr. Can BALAS'a çok teşekkür ederim. Çalışmalarım süresince emeklerini esirgemeyen değerli hocalarım Dr. Önder KOÇYİĞİT ve Prof. Dr. Serhat KÜÇÜKALİ'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmasının modelleme ve veri tabanı uygulamalarında HYDROTAM-3D'nin kullanım imkanını veren Gazi Üniversitesi Teknoparkında bulunan DLTM Yazılım Teknolojileri 'ne ve sistemin kullanımını sağlayan Prof. Dr. Lale BALAS ve Egemen Ander BALAS'a teşekkür ederim.

FLOW-3D Türkiye Temsilcisi Sayın Özgün GÜLER'e ve Onur GÜNDÜZTEPE'ye destekleri için müteşekkirim. Tezin hazırlık sürecinde yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Olcay EĞRİBOYUN, Abdulkadir YILMAZ ve Onur BAKTIR'a çok teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde yegâne emek sahibi, annem Fethiye UĞURLU'ya, yoğun çalışma sürecimdeki anlayışının yanı sıra dil, anlatım ve yazım kuralları konusundaki desteği için sevgili eşim Menekşe UĞURLU'ya, hayatımın anlamı çocuklarım Fethiye ve Halil'e şükranlarımı sunuyorum. Bu tezi küçük yaşta kaybettiğim sevgili babam Halil UĞURLU'ya adıyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil **Sayfa**

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	Dalga genliği
C_B	Blok katsayısı
C_c	Yanaşma şekli faktörü
C_D	Hidrodinamik direnç katsayısı
Ce	Dışmerkezlik faktörü
C_M	Hidrodinamik atalet katsayısı
D/d	Çap
Dn50	Koruma tabakasının nominal çapı
E_f	Gemi yanaşma enerjisi
du/dt	Yörüngesel ivme
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
km	Kilometre
M_s	Gemi kütlesi
ρ	Deniz suyunun özgül kütlesi
τ	Kesme gerilmesi
T	Dalga periyodu
u	Yörüngesel hız / akışkan hız alanı
V	Gemi yanaşma hızı
YSS	Yüksek su seviyesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
ANFIS	Adaptive network-based fuzzy inference system
ANN	Çok katmanlı önden beslemeli yapay sinir ağı
BMİM	Birinci mertebe ikinci moment
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Kısaltmalar	Açıklamalar
DIM	Direkt integrasyon metodu
FEA	Sonlu elemanlar yöntemi
FEMDEM	Birleşik sonlu – ayrık elemanlar yöntemi
HNN	Hibrit yapay sinir ağı
KC	Keulegan-Carpenter sayısı
MCS	Monte Carlo simülasyonu
PDEM	Olasılık yoğunluk gelişim metodu
RANS	Reynolds – Average Navier – Stokes
SORM	Second-order reliability method
TPE	Türk Patent ve Marka Kurumu

1. GİRİŞ

Ülkemiz 8.333 km kıyı şeridi uzunluğuna sahiptir. Son yıllarda artan bir ivme ile bu bölgelerde kıyı yapıları inşa edilmeye devam edilmektedir. Bu yapılar arasında balıkçı barınakları, kıyı koruma tahkimatları ve limanlar bulunmakla birlikte denizel alanın doldurulmasıyla elde edilen havalimanları da önemli yer tutmaktadır. Deniz doldurulması yoluyla elde edilen yapılar arasında yer alan Rize-Artvin Havalimanı, dünyanın en derin kıyı yapısı olma özelliğini taşımaktadır.

Bu çalışmanın ilk kısmı kapsamında, inşaat maliyetleri oldukça yüksek olan ve yapımları da karada inşa edilen yapılara göre zorluklar içeren derin deniz yapılarının projelerinin yeni bir bakış açısı ile ele alınması hedeflenmiştir. Kısaca olasılıksal (istatistiki) tasarım olarak özetlenebilecek bu yöntem ile belirlenimci tasarım sonucu göz önüne alınamayan gelecek riskler değerlendirilerek en iyi (optimum) tasarım yapılabilmektedir. Bu duruma bağlı olarak daha emniyetli yapıların daha düşük maliyetle yapılması mümkün olmaktadır.

Belirlenimci tasarım, tasarım faaliyetini analitik olarak tanımlayarak matematiksel yöntemler aracılığıyla çözmek üzerine kurulu bir yöntemdir. Bu yöntemde, emniyetli tarafta kalmak için uygulanan yükün maksimum değerinin alınması ve kullanılan malzeme dayanımına ait değerlerin minimumunun alınması esastır. Olasılığa dayalı tasarım ise belirli bir güvenirlik sınırında (limit durum) tasarım yapılmasıdır. Olasılığa dayalı tasarım, derin deniz yapılarının tasarımında olduğu gibi tasarım parametrelerinin belirsizlik ya da değişkenlik içermesi gibi durumlarda büyük öneme sahiptir.

Olasılığa dayalı tasarım çerçevesinde Monte Carlo Simülasyonu (MCS) yöntemi ile analizler yapılmıştır. Monte Carlo Simülasyonu, belirsiz bir olayın sonuçlarını öngörebilen bir matematiksel tekniktir. MCS, sisteme etki eden ve olasılık dağılımları bilinen parametrelerin limit durumda çok sayıda benzeştirilmesi ile yapılır. MCS, sisteme etki eden değişkenlerin olasılık dağılım fonksiyonlarından rastgele örnekleme vasıtasıyla limit durumu benzeştirir. Benzeşim sayısı arttıkça hata oranı azalmaktadır. MCS analizleri, Oracle firmasının Crystal Ball yazılımı satın alınarak, akademik lisanslı yazılım ile gerçekleştirilmiştir.

Ülkemizde kıyı yapıları belirlenimci yaklaşımla tasarlanarak inşaat aşamasına geçilmektedir. Mevcut mevzuatta da (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016)

belirlenimci yaklaşım yer almaktadır. Bu nedenle aşırı tasarım ile tasarım yapılması da olasıdır. Bu çalışmada olasılıksal yaklaşım ile tasarlanan derin deniz yapıların daha emniyetli ve daha ekonomik olarak inşa edilebileceğinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Bu çalışma ile koruma tabakalarının ekonomik ve emniyet yönünden karşılaştırmaları yapılmıştır. Tezin amacı ve getirdiği yenilik, ülkemizin ilk, tek sıra koruma tabakasının geliştirilmesi ve patent altına alınmasıdır. Piblok+ ismi altında patent korumasına alınan ülkemizin ilk yerli tek sıra koruma tabakası Arif UĞURLU, Prof. Dr. Abdussamet ASLAN ve Prof. Dr. Can Elmar BALAS ve tarafından geliştirilmiştir (Ugurlu vd., 2022).

Ülkemizin artan kıyı yapıları inşaatına bağlı olarak tek sıra koruma tabakalarının kullanımı da artmıştır. Yurt dışı patentli olan bu ürünlerin kullanılabilmesi için ülkemiz yurt dışına yabancı para birimi cinsinden oldukça yüksek patent kullanım ücretleri ödemektedir. Ülkemizde geliştirilen ilk tek sıra koruma tabakası olan Piblok+ ile yurt dışına ödenen bu meblağın ülkemizde kalması hedeflenmiştir.

Piblok+ numerik analizleri, HAD yöntemi ile yapılmıştır. HAD analizleri, FLOW-3D yazılımı ile Gazi Üniversitesi'nin akademik kullanım izni çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. FLOW-3D, kıyı yapıları için fiziksel akış sürecini benzeştiren ve hidrolik alanında geniş kullanımı olan bir lisanslı yazılımdır. Serbest yüzey akışlarını yüksek hassasiyetle modelleyen FLOW-3D, Piblok+ geliştirilirken kullanılan HAD yazılımıdır. FLOW–3D kapsamında yapılan analizlere ait sonuçlar tez kapsamında detaylandırılmıştır.

Tezde yapılan çalışmaların bütünleşik olması amacıyla Karadeniz'de inşa edilen bir proje yardımıyla doğrulanması için karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Karşılaştırmalı analizlerin uygulanacağı proje olarak 14.05.2022 tarihinde hizmete giren ve dünyanın en derin kıyı yapısı olan Rize-Artvin Havalimanı seçilmiştir.

Rize-Artvin Havalimanı, denize dolgu ile inşa edilmiş bir kıyı yapısıdır. Karadeniz Bölgesi'nde dalga yükseklikleri yüksek değerlere ulaşmaktadır. Koruma tabakaları direkt bu dalgalara maruz kalmaktadır. Bu nedenle koruma tabakalarının yapısı derin deniz yapılarının en önemli bileşeni olarak ön plana çıkmaktadır. Aynı zamanda yapının maruz kaldığı tasarım belirgin dalga yüksekliğini (H_s) yüksek doğruluk oranı ile belirlemek de kıyı yapılarının tasarımında bir başka önemli parametredir. Bu amaçla tez kapsamında, tamamen milli

imkânlarla Prof. Dr. Lale BALAS tarafından geliştirilen HYDROTAM-3D yazılımı kullanılmıştır (HYDROTAM-3D, 2023). HYDROTAM-3D yazılımı bünyesinde rüzgâr-dalga iklimi belirlenmesinin yanı sıra dalga transformasyonu, kıyı morfolojisi gibi kıyısal sorunların çözülmesi amacıyla alt modeller geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur (L. Balas et al., 2020; Balas L & Cebe K, 2021; Coşkun E & Balas L, 2018; Genc et al., 2020; Ülker et al., 2022; Yılmaz et al., 2015). Tüm modeller ülkemiz kıyıları ile kalibre edilmiş olup verdiği sonuçlar, kullanım açısından ileri düzeyde güvenilirdir (Balas ve Özhan, 2000; Balas ve Özhan, 2001; Balas ve Özhan, 2002).

Derinliği -27.60 m'ye kadar inen Rize-Artvin Havalimanı karşılaştırmalı tasarımı için Piblok+ ve Accropode II kullanılmıştır. Tasarımların emniyet ve ekonomik karşılaştırmaları, tez kapsamında sunulmuştur. Türk araştırmacılar tarafından geliştirilen Piblok+ tek sıra koruma tabakası, karşılaştırmalı analizlerde ekonomi ve emniyet yönünden başarılı sonuçları yakalamıştır.

Türk araştırmacılar tarafından geliştirilen Piblok+ tek sıra koruma tabakasının Rize-Artvin Havalimanı projesinde kullanılması durumu tez kapsamında irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, fiziksel modelleri yapılmış olan Accropode II alternatifler ile emniyet ve ekonomi yönünden karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde Piblok+, ekonomi ve emniyet yönünden iyi sonuçlar vermiştir.

Bu tezdeki araştırma hedefi de ülkemizin ilk tek sıra koruma tabakasının geliştirilmesidir. Türkiye, yabancı menşeli ürünlere patent ücreti olarak yüksek miktarlar ödemektedir. Bu durumun önüne geçilip ülkemize stratejik bir ürünün kazandırılması hedefi için Türk araştırmacılar tarafından geliştirilen Piblok+, bu tez kapsamında sayısal analiz ile incelenmiş ve muadilleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar Piblok+ açısından başarılıdır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Farklı koruma tabakalarının HAD ile modellenmesi, kıyı mühendisliği alanında başarıyla uygulanmaktadır. FLOW-3D ile Accropode tek sıra koruma tabakasının sayısal modellemeleri yapılmıştır. Sonuçlar, yazılımın birimler arasında akışkan hareketini geleneksel modellere göre çok daha iyi analiz ettiğini göstermiştir. Prensip olarak yapının modellenmesinde kısıtlama bulunmadığı kabul edilmiştir. Bu duruma batık/batık olmayan dalgakıranlar ve dalgakıranların tüm bölümleri (filtre, çekirdek ve topuk) dahildir (Dentale, 2014).

Başka bir HAD modelleme çalışmasında, Core-Loc üniteleri gerçek boyutlu olarak numerik modele aktarılmış ve modellenmiştir. Yerleştirme sıklığının koruma tabakalarının performansını etkileyen en önemli faktör olduğu ve daha sık yerleşimin stabiliteyi artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca tabandan krete daha az sıra koruma tabakası barındıran yapıların daha stabil olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucu, yapıların dalga altındaki gerçek davranışına ilişkin karmaşık kıyı yapılarının davranışı hakkında öngörü vermektedir (Eleni, 2015).

Pacitan, Endonezya'da yer alan Sudimoro elektrik santralinin taş dolgu dalgakıranı için bir çalışma yapılmıştır (Armono vd., 2021). Çalışma kapsamında dalgakıranın hidrolik stabilitesi MCS yöntemi ile çalışılmıştır. MCS'de Hudson ve Van der Meer formülleri kullanılmıştır. Çalışma sonucu bahse konu dalgakıranın mevcut durumunun (12 t dolosse) Hudson yaklaşımına göre %98,8, van der Meer formülüne göre ise %95,12 oranında hidrolik stabilite koşullarını karşıladığı görülmüştür. Yazarlar tarafından önerilen 5,06 t ağırlığındaki dolosse koruma tabakası ise Hudson için %94, van der Meer için %79,28 olarak stabilite koşullarını yerine getirmektedir. Bu sonuca ilave olarak çalışma, Van der Meer formülü ile düşük hasar oranında Hudson formülüne göre daha yüksek tasarım rijitliği sunmaktadır.

Güvenirlik tabanlı tasarım, geleneksel tasarım yöntemlerine göre avantajlara sahiptir. Bunun nedeni, güvenirlik tabanlı tasarımın yapı ömrü boyunca görülen rastgele yük ve dayanım parametrelerinin ilk tasarım esnasında öngörülmesine olanak vermesidir. Bu olanak, tasarımcıya ekonomik optimizasyon yapma şansı tanır. Çalışmada gelgit, dalga, fırtına ve rüzgâr kabarması gibi tasarım parametrelerinin MCS kullanılarak limit durumda olasılık dağılımları ile modellenmesi önerilmektedir. Bu model, Galler'in güneybatı kıyısında yer alan üç adet kıyı koruma yapısına uygulanmıştır. Yapılardan ikisinin güvenli olduğu

belirlenirken bir tanesi güvensiz çıkmıştır. Model, yapının %(0-5) hasarsızlık limitinin 25 yıl içinde aşılma olasılığını %66 olarak vermiştir. Yerinde yapılan gözlemlerde de hasar seviye durumunu teyit etmiştir (C. E. Balas ve Balas, 2002).

(C. E. Balas vd., 2010) tarafından yapılan çalışmada, yapay sinir ağlarının (ANN) karmaşık hidrolik sistemlere ait lineer olmayan karakteristiklerin belirlenmesinde başarılı olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen HNN modelinin ise, yapay sinir ağları ile karşılaştırıldığında daha iyi bir tasarım ilişkisi yakaladığı vurgulanmıştır. Van der Meer limit durum denkleminde, test aşamasında kullanılmayan veri kümeleri tarafından eğitilen yapay sinir ağları yapının ön tasarımı için kullanılmıştır. Nihai tasarım için ise fiziksel modellerin gerekli olduğu dile getirilmiştir.

Risk analiz yöntemleri, hasar yönetimi karar verme mekanizmasına bölgesel olduğu kadar ulusal tabanda da akılcı bir temel sağlamaktadır. Çalışma kapsamında Güney Galler Bristol Kanalı'nda yer alan iki tahkimatın güvenliği, MCS ve SORM yöntemlerini birleştirerek geliştirilen bir modelle incelenmiştir. Tahkimatlardan birisi stabil çıkarken diğerinin tamirat ve bakım gerektirdiği ortaya çıkmıştır. Yerinde yapılan incelemeler de modelleri doğrulayıcı sonuçlar vermiştir (C. E. Balas, Balas, vd., 2004).

Karadeniz Sahil Yolu Piraziz-Sarp kesiminde yer alan kıyı koruma yapılarının (tahkimat) güvenirlik analizi, bir çalışma kapsamında incelenmiştir. Güvenirlik analizi, BMİM ve MCS yöntemleri ile yapılmıştır. Yöntemler için Hudson ve Van der Meer denklemleri limit durum fonksiyonları kullanılmıştır. Karadeniz Sahil Yolu Piraziz-Sarp kesiminde yer alan kıyı koruma yapılarının ekonomik ömrü dolmadan %(0-5) hasar oranını geçeceği belirlenmiştir. Yerinde yapılan incelemelerde de bu kesimde hasarların oluştuğu ve yer yer yıkılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir (C. Balas ve Tür, 2010b).

Yapım maliyeti oldukça yüksek olan kıyı yapılarının tasarımında belirgin dalga yüksekliği (H_s) en önemli parametredir. H_s verilerindeki eksiklikler, projelendirme aşamasında hatalara sebep olmaktadır. Yapılan bir çalışmada diğer yapay zekâ teknikleri ile kıyaslandığında ANFIS'in daha güvenilir sonuçlar ürettiği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca H_s tahmin modellerinde tahmin yapılan zaman aralığının kısalmasının, tahmin değerlerindeki hataları azaltıcı yönde etki edeceği belirtilmiştir (C. Balas ve Tür, 2010a).

Türkiye’nin güvenirlik tabanlı ilk kıyı yapısı proje yönetimi, (C. E. Balas ve Ergin, 2002) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Mezitli (İçel) yat limanı projesi örnek uygulama olarak incelenmiştir. İnşaat süresinde meydana gelebilecek fırtınaların vereceği hasar kaynaklı gecikmeler, güvenirlik tabanlı yaklaşımla belirlenerek inşaat aşamalarının doğru şekilde planlanması sağlanmaktadır. MCS kullanılarak yapılan güvenirlik tabanlı yaklaşımın belirlenimci yaklaşıma göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kıyı yapılarının planlama aşamasında güvenirliğe dayalı tasarım, belirsizlikleri göz önüne aldığı için daha iyi sonuçlar vermektedir. Tsunami her ne kadar ülkemiz kıyı yapılarının tasarımında birincil önemde olmasa da sismik hareketliliği yüksek bölgelerde göz önüne alınması gereklidir. Tsunamiyi bünyesine dahil eden güvenirliğe dayalı analizle Esenköy Balıkçı Barınağı dalgakıranı irdelenmiştir. Vaka çalışmasında kullanılan model, tsunami riskini hesaba katabilmektedir. Güvenirlik tabanlı yapısal risk değerlendirmeleri; afet yönetimi ve nükleer santraller gibi önemli kıyı yapıları için risk azaltma mekanizmasıdır (Ergin ve Balas, 2006).

Bir kıyı yapısının bulunduğu deniz alanında, derin sularda ölçülen ya da gözlemlenen uzun dönem dalga istatistiğine bağlı göçme olasılığı, dalga ilerlemesi modeli uygulanarak öngörülebilir. Uç değer (ekstrem) analiz ile fırtınalardaki deniz durumu arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu iki yaklaşım da tasarımda benzer yıkılma olasılıkları vermiştir. DIM ve MCS yöntemleri uygulanarak benzer sonuçlar elde edilmiştir (Malliouri vd., 2021).

(C. E. Balas ve Koç, 2006) tarafından eksik dalga verilerinin öngörülmesi ve taş dolgu dalgakıranların hasar seviyesinin aşılma olasılığını belirleyen yapay zekâ modeli sunulmuştur. Çalışma sonucunda taş dolgu dalgakıranların hem stabilite yönünden hem de ekonomik yönden optimizasyonunun yapay zekâ ile güvenli şekilde yapılabileceği belirlenmiştir. Ek olarak yapay zekâ yöntemlerinin taş dolgu dalgakıranların tasarımındaki belirsizlikleri daha iyi modellediği ve bu duruma bağlı olarak güvenirlik analizinde kullanılan modelleri desteklediği belirtilmiştir.

Dolosse ve Core-Loc taş dolgu dalgakıranlarda kullanılan beton koruma birimleridir. Dolosse için dalga etkisi altında yerinden oynama (rocking) ve kopma sonucu birimlerden ayrılan parçaların dalga etkisi ile yeniden birime çarpma (pendulum) durumları, FEMDEM yöntemi ile incelenmiştir. Her iki deneyde de hem sağlam hem de daha önce çatlak

barındıran birimler modellenmiş ve kırıkların ilerlemesi irdelenmiştir. Core-Loc üzerinde yapılan FEMDEM analizlerinde ise birimlerin birbirleri ile olan etkileşimleri ve kırılmaları incelenmiştir. Sonuç olarak Dolosse ve Core-Loc birimleri üzerinde yapılan modellemeler, FEMDEM metodu bünyesindeki üç boyutlu kırılma modelinin karmaşık gerilme alanlarındaki tüm kırılma sürecini belirleyebildiğini göstermiştir (Guo vd., 2015).

Taş dolgu dalgakıranlarda koruma tabakası yerleşimi ve yerleştirme yoğunluğu, inşa maliyetini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Yapılan çalışmada, boşluk oranının tek ve çift sıra koruma tabaklarının hidrolik stabilitesi üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Değişik boşluk oranlarına ve geçirimli çekirdeğe sahip rastgele yerleşimli küp blokların 2 boyutlu hidrolik stabilite testlerine odaklanmıştır. Stabilite sayısı, çift sıra rastgele yerleştirilmiş küp koruma tabakaları için 1,2 mertebesinde bir kuvvet etkileşimi göstermektedir. Ancak bu etkileşimin sadece belirli yerleşime sahip küp bloklar için geçerli olduğu ve çalışmanın tüm koruma tabakaları için yapılması gerekliliği dile getirilmiştir (Medina vd., 2014).

Alanya bölgesinin dalga parametrelerinin (dalga yüksekliği, periyodu ve yönü) belirlenmesi için ileri beslemeli ve yinelemeli yapay sinir ağları (ANN) kullanılmıştır. Bir yapay zekâ tekniği olan ileri beslemeli ve yinelemeli sinir ağları, Mersin Yat Limanı ana dalgakıranı, güvenirlik ve stabilite analizlerine uygulanmıştır. Dalga parametrelerinin belirlenmesinde sinir ağlarının stokastik modellere göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Taş dolgu kıyı yapılarının ön tasarımı için, Van der Meer hidrolik model test verilerini kullanan "tasarım yapay sinir ağı" geliştirilmiş ve tasarım uygulamaları için doğrulanmıştır. Ölçümlerdeki eksik dalga parametrelerini ve taş dolgu mendireğin hasar seviyesinin aşılma olasılıklarını tahmin edebilen yapay zekâ modeli sunulmuştur. Bu modelde hem dalga parametresi tahmini hem de risk seviyesi değerlendirmesi için yapay zekâ teknikleri kullanılmaktadır. Güvenirliğe dayalı tasarımın, yapay zekâ teknikleri ile ikinci dereceden yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir (C. Balas, 2004).

Sonuç olarak, taş dolgu dalgakıranlar için güvenilirliğe dayalı tasarım üzerine yapılan araştırmalar, bu yapıların performansını ve dayanıklılığını artırmaya yönelik önemli gelişmeler göstermektedir. Bu çalışmalar, dalgakıranların maruz kaldığı çevresel koşulların ve yüklerin daha iyi anlaşılmasını sağlamış ve tasarım süreçlerine entegre edilmiştir. Örneğin, risk analizi ve belirsizliklerin yönetimi gibi konular, güvenilirlik değerlendirmelerinde önemli bir yer tutmuştur. Ayrıca, yapısal analizlerde gelişmiş sayısal

yöntemlerin kullanımı, taş dolgu dalgakıranların davranışını daha doğru bir şekilde tahmin etmeye yardımcı olmuştur (Karimaei Tabarestani vd., 2020).

Birçok çalışma, özellikle iklim değişikliği ve deniz seviyesindeki artışın dalgakıran tasarımlarını nasıl etkilediğine odaklanmıştır. Bu bağlamda, ekstrem hava olaylarının sıklığının ve şiddetinin artması, dalgakıranların dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü test eden önemli faktörler olarak görülmektedir. Yeni modeller ve simülasyon teknikleri kullanılarak yapılan araştırmalar, bu etkilerin daha iyi anlaşılmasını ve uygun tasarım kriterlerinin belirlenmesini sağlamıştır (Isobe, 2013)

Taş dolgu dalgakıranlar için inşaat teknikleri ve yapı çeşitleri üzerine yapılan araştırmalar, bu yapıların güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır (Van Der Meer, 1995). Genel olarak, son yıllardaki literatür, taş dolgu dalgakıranların tasarımında güvenilirliği artırmaya yönelik çok boyutlu bir yaklaşımın benimsendiğini göstermektedir. Yeni teknolojiler ve sensörler kullanılarak dalgakıranların stabilitesinin gözlemlenmesi için yapılan çalışmalar, dalgakıranların gerçek zamanlı izlenmesini ve olası hasarların erken tespitini sağlamaktadır. Bu çalışmalar yatırım maliyetleri son derece yüksek olan kıyı yapılarının hem mevcut stabilitelerinin korunması için hem de gelecekte yapılacak yapıları daha optimum tasarlamak için son derece önemlidir (Henriques vd., 2017).

Literatürde taş dolgu dalgakıranlar için olasılıksal veya belirlenimci analizler, mevcut koruma tabakaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında ise Piblok+ tasarlanarak yeni bir tek sıra koruma tabakası geliştirilmiş ve olasılık tabanlı MCS ile ön tasarımda ekonomik bir çözüm sağlayacağı görülmüştür. Literatüre katkı olarak, Türk araştırmacılar tarafından geliştirilen Piblok+ tek sıra koruma tabakasının numerik analizleri HAD yöntemi ile yapılmış ve sonuçlar diğer tek sıra koruma tabakaları ile karşılaştırılmıştır. Ön değerlendirme sonuçları umut verici olan Piblok+ için hidrolik model deneyleri aşamasına geçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

3. AMAÇ

Tezde derin kıyı yapıları için Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ve güvenirlik tabanlı olasılıksal bir tasarım modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Güvenirlik alt modeli stabilite için limit durum denklemlerini kullanırken, Monte Carlo alt modeli, iklim değişikliği etkisinin belirlenmesi dahil olasılıksal tüm çevresel parametreleri tasarımda değerlendirebilecektir. Hudson limit durum fonksiyonu (yapısal stabilite analizi kontrolü), MCS alt modelinde iklim değişikliği ve deniz seviyesi artışı gözetilerek ilişkilendirilecektir. Küresel ısınmaya bağlı yapı stabilitesinin değişimi için model geliştirilerek, çevresel belirsizliklerin hesaplanması amaçlanmıştır. İklim değişikliğini gözeten tasarım standartları için yol haritası önerilecektir.

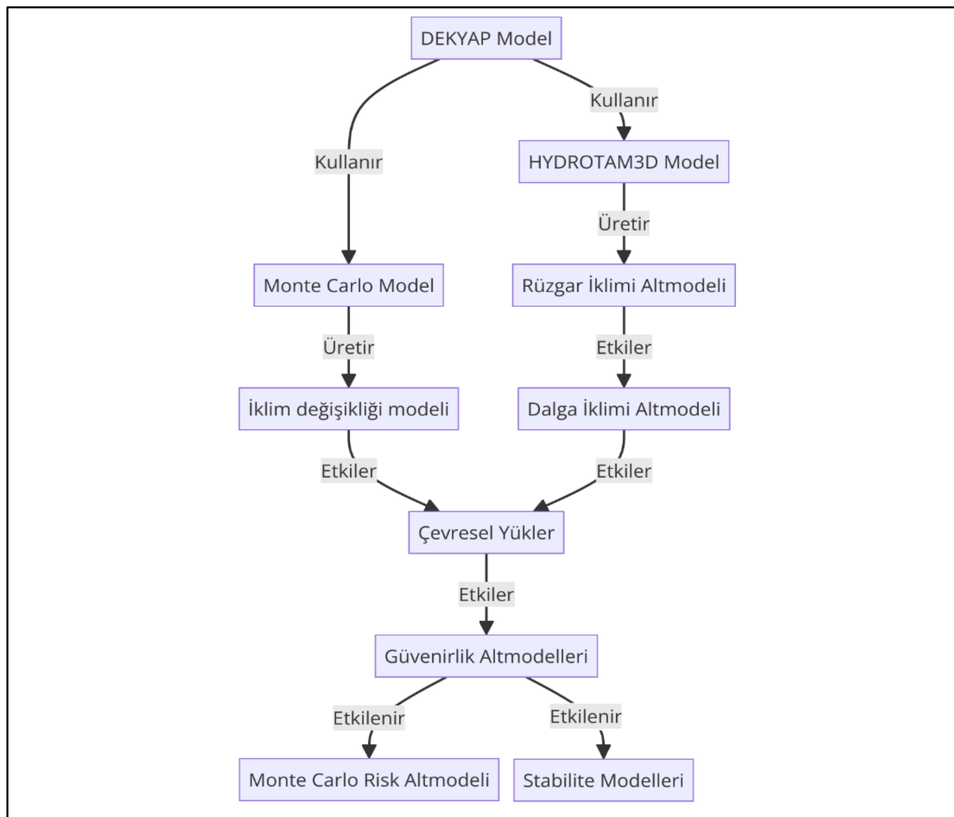
Arif UĞURLU, Prof. Dr. Can Elmar BALAS ve Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN tarafından geliştirilerek patent alınan, ülkemizin ilk tek sıra koruma tabakası derin deniz yapılarının tasarımı için incelenmiştir. Aşma, ekonomi ve stabilite yönünden HAD yardımı ile yapılan modellemeler ile tezde geliştirilen Piblok+ koruma tabakası, muadili Accropode II ile karşılaştırılmıştır. Patent prosedürünün tamamlanmasına müteakip (TPE başvuru numarası: 2022/018635) hidrolik model deneyleri ile nihai ürün elde edilecektir.

4. DERİN DENİZ VE KIYI YAPILARI İÇİN HİBRİD TASARIM RİSK (DEKYAP) MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Tezde derin kıyı yapıları için olasılıksal ve belirlenimci yöntemler içeren hibrid bir tasarım modeli geliştirilmiştir. Model sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Temel alt model, Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ve güvenirlik alt modelleridir. Çok sayıda tekrarlanan rastgele örneklemelerle (çalışma kapsamında 30.000) belirlenimci yöntemle öngörülmesi zor olan belirsizlikler (küresel ısınma sonucu deniz seviyesi yükselmesi) öngörülebilmektedir. Güvenirlik alt modeli stabilite için kullanılırken Monte Carlo alt modeli, iklim değişikliği etkisinin belirlenmesi dahil olasılıksal tüm çevresel parametreler için kullanılmaktadır.

Tez kapsamında yer alan Piblok+ tek sıra koruma tabakasının geliştirilmesi sürecinde numerik analizler, HAD tabanlı olarak yapılmış ve FLOW-3D yazılımı kullanılmıştır. Geliştirilen DEKYAP modelinin uygulama prensiplerini gösteren zihin haritası (mind map)

Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Geliştirilen DEKYAP modelinin işleyiş akıl haritası

5. DEKYAP MODEL YAPISI

Tezde derin deniz ve kıyı yapılarının tasarımı için hibrit bir risk tasarım modeli geliştirilmiştir. Karadeniz Bölgesi'nde yer alan limanlar için, deniz koşullarının zorluğu açısından risk analizi yapılmalı ve DEKYAP modeli kullanılmalıdır. Örnek olarak, dalgakıran tasarımı belirlenimci yöntemle yapılan, analiz sürecinde olasılıksal yaklaşıma yer verilmeyen ve risk analizi gerçekleştirilmeyen durumda, yapı karşılaştığı bir fırtına sonrası servis yeteneğini tamamen kaybetmiştir. Belirsizlikler tasarımda değerlendirilmediğinde değişen deniz koşullarının yıkıcı etkisi limanın hasar görmesine yol açmıştır. Limanın hasar görmeden önceki ve sonraki hâlleri sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görülebilmektedir. Koruma tabakasını teşkil eden tetrapodların hasar sonrası dağılarak denize düştüğü görseller Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'tür.

Limanın tasarımında olasılıksal tasarımın ve risk analiz modelinin kullanılmamış olmasının neden olduğu büyük hasar, bu örnekte oldukça belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle tüm mevzuatlarda belirlenimci yöntemle birlikte olasılıksal yöntemin de yer alması ve belirsizliklerin bu tezde geliştirilen risk modeli ile ön görülerek, gelecek hasarların önüne geçilmesi, iklim değişikliği döneminde son derece önemlidir.

Şekil 5.1. Mendireğin hasar görmeden önceki durumu

Şekil 5.2. Mendireğin hasardan sonraki durumu

Şekil 5.3. Koruma tabakasında yer alan tetrapodların hasar sonrası durumu

Şekil 5.4. Koruma tabakasında yer alan tetrapodların hasar sonrası durumu

Risk analizinin gerçekleştirilmesinde, deniz yapılarının hasar olasılığını belirlemek için (C. E. Balas, Koç, vd., 2004) tarafından geliştirilen MCS alt-modeli kullanılmıştır. Tez kapsamında geliştirilen DEKYAP modeli, deniz yapılarının ekonomik ömürleri içinde karşılaşabileceği hasar olasılıklarını güvenilir şekilde tahmin etmek için etkili bir yöntem sunmaktadır. Tezin yenilikçi yönlerinden biri, MCS alt modelinin HYDROTAM-3D üç boyutlu sayısal modelle entegrasyonudur.

Bir yapının güvenilirliği, yapının üzerine uygulanabilecek direnç ve yük koşullarının ortak etkisine bağlıdır. Belirli bir yenilme modu için tanımlanan limit durum fonksiyonu, temel değişkenlerin bir vektör tarafından (X = (X1, X2, ..., Xn) gösterilen yük ve dayanım değişkenlerinden oluşur. Limit durumda temel değişkenlerin fonksiyonu, g(X) = (X1, X2, ..., Xn) yenilme fonksiyonudur. Geometrik olarak limit durum denklemi, yenilme bölgesini ($g(X) \leq 0$) güvenli bölgeden ($g(X)>0$) ayıran yenilme yüzeyidir. Eğer temel değişkenler,

rastgele değişkenler olarak temsil edilir ve olasılık dağılımları ile açıklanırsa yenilme olasılığı $P(g(X) \leq 0)$ şeklinde oluşur. Bu olasılık, genellikle MCS gibi sayısal yöntemlerle hesaplanır.

Taş dolgu dalgakıranların belirlenimci tasarımı, HYDROTAM-3D modeli tarafından tahmin edilen belirgin dalga yüksekliği ve Accropode II, Piblok+ tek sıra koruma tabakaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tasarım risk modeli DEKYAP, tek koruma tabakalı taş dolgu kıyı ve derin deniz yapıları için geliştirilmiş olup güvenirliğe dayalı yaklaşımı içermektedir. Bu yapıların tasarımında risk modelinin kullanılmamasının neden olduğu hasarlar, Karadeniz'deki örneklerle ortaya konmuştur. Bu nedenle tüm mevzuatlarda belirlenimci yöntemle birlikte olasılıksal yöntemin yer alması ve belirsizliklerin tezde geliştirilen tasarım risk modeli ile ön görülerek gelecek hasarların önüne geçilmesi, iklim değişikliği çağında son derece önemlidir.

Modelde taş dolgu dalgakıranlar için limit durum (Muttray, 2006) tarafından önerilen fonksiyonlar ile tanımlanmıştır. Limit duruma uygulanan MCS ile yapının işletme ömrü boyunca maruz kalacağı çevresel yükler ve etkiler altında sağlam kalabilme olasılığı belirlenmektedir.

5.1. Alt model 1: Muttray yaklaşımı

Olasılıksal tasarım, direnç (R) ve yük (L) arasındaki dengeyi belirten Z limit durumu (performans) fonksiyonunu kullanarak MCS ile gerçekleştirilmiştir: Z = R-L. Taş dolgu dalgakıranlar, Accropode II limit durum fonksiyonu kullanılarak tasarlanmıştır. Limit durum fonksiyonunun olasılık dağılımları ve MCS'de tasarım parametrelerinin değişkenlikleri, Çizelge *5.1*'de tanımlanmıştır.

MCS sonuçlarına göre Accropode II, limit durum fonksiyonu (Eşitlik 5.1) (Muttray, 2006) ile yapı ömrü boyunca (100 yıl içinde) hasarsızlık düzeyinin geçilme riski %100 'ün altında kalmaktadır. Bu durum, Şekil 5.5'te görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere ömrü boyunca, (Muttray, 2006) tarafından tanımlanan Accropode II limit durum fonksiyonu ile gövde için %(0-5) hasarsızlık düzeyinin geçilme olasılığı %40,951'dir.

Accropode II limit durum fonksiyonu, Eşitlik 5.1 ’de verilmiştir.

$$\Delta D_n Y_1 - H_{sp} = 0 \tag{5.1}$$

Accropode II, sıfır hasar tasarım koşuları altında tasarlanmıştır.

Denklem 5.1 ’de:

H_{sp}: MCS'de modellenen yapı topuğuna gelen tasarım belirgin dalga yüksekliği (m), Deniz Seviyesi Değişikliği (DSS) dikkate alınarak belirlenmektedir. DSS HYDROTAM-3D'nin iklim değişikliği alt modülünde yer alan deniz seviyesi yükselmesi değerinin fırtına kabarması ile toplanmasıyla hesaplanmıştır.

$$\Delta = \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right) \tag{5.2}$$

γ_r : Taş özgül ağırlığı (t/m^3)
γ_w : Deniz suyunun özgül ağırlığı (t/m^3)
D_{n50} : Koruma tabakasının nominal çapı is $D_{n50} = (W_{50}/\ \gamma_r)^{1/3}$
Y_1: Kritik Stabilite Katsayıları (Muttray, 2006)

Accropode için Kritik Stabilite Katsayıları (Hasar başlangıcı için $Hs/\Delta D_n = 3.7$ ve yıkılma için $Hs/\Delta D_n = 4.1$ olarak) (van der Meer, 1988) tarafından belirlenmiştir. Sogreah, hasar başlangıcı için $Hs/\Delta D_n = 3.2$ ve yıkılma için $Hs/\Delta D_n = 3.7$ değerlerini önermiştir (Vicent et al., 1989). Van der Meer ve Vicent'ın sonuçları, iki boyutlu hidrolik deneylere dayanmakta ve ortalama değeri temsil etmekte ve tasarım için alt zarf sınırını oluşturmaktadır. Monte Carlo benzeşiminde log normal olasılık dağılımı, denklemlerde güven aralığını belirler.

Accropode, tasarım koşullarında sıfır hasar için tasarlanmıştır. Tasarım koşullarında herhangi bir hasar; koruma tabakası taşları boyutu, yerleşim, topuk tasarımı, aşma tasarımı vb. ile potansiyel sorunları göstermektedir. Accropode koruma tabakası taşları 1:1.5 veya 1:1.33 eğimlere yerleştirilmelidir.

Ön tasarım için (Muttray, 2006) tarafından aşağıdaki stabilite numaraları önerilmiştir:

- Accropode:

Gövde için (kırılmayan ve kırılan dalgalar için) Hs/ΔDn = 2.7 ve 2.5

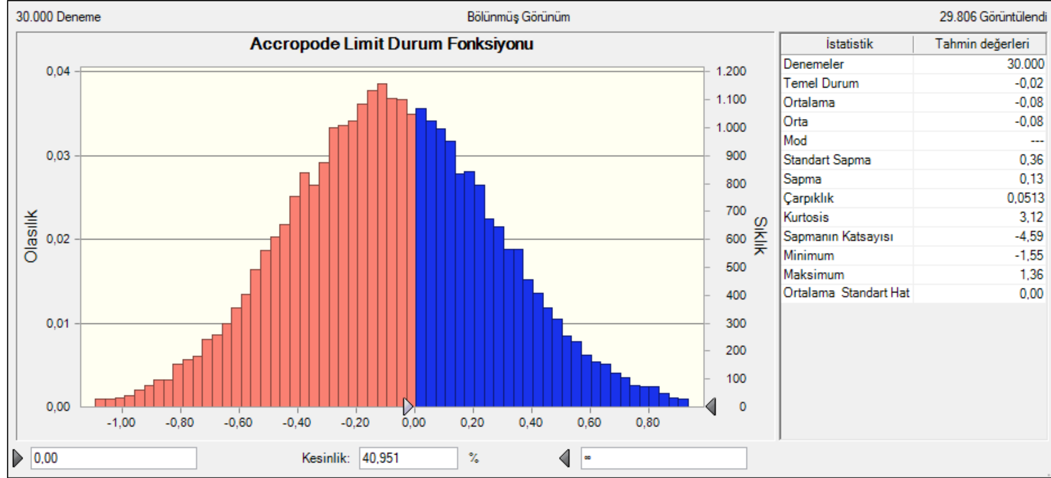
Müzvar için (kırılmayan ve kırılan dalgalar için) Hs/ΔDn = 2.5 ve 2.3

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, taş dolgu dalgakıranlar için Rize-Artvin Havalimanı dalgakıran kesiti kullanılmıştır. Bahse konu yapı için tasarım dalgası 7,70 m ve koruma tabakası hacmi 12 m^3 'tür (Uğurlu, 2017). Kesit ön tasarımı, Accropode II olarak (Muttray, 2006)'de verilen limit durum fonksiyonunun olasılıksal yaklaşımla kontrol edilerek fiziksel model sonucu elde edilen koruma tabakası ağırlığı ile karşılaştırılmıştır. Olasılıksal tasarım kontrolü hem müzvar hem de gövde kesiti için farklı kritik stabilite katsayıları ile tekrarlanmıştır.

MCS sonuçlarına göre Accropode II limit durum fonksiyonu (Eşitlik 5.1) (Muttray, 2006) ile yapı ömrü boyunca (100 yıl içinde) hasarsızlık düzeyinin geçilme riski %100 'ün altında kalmaktadır. Bu durum, Şekil 5.5'te görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere ömrü boyunca, (Muttray, 2006) tarafından tanımlanan Accropode II limit durum fonksiyonu ile gövde için %(0-5) hasarsızlık düzeyinin geçilme olasılığı %40,951'dir.

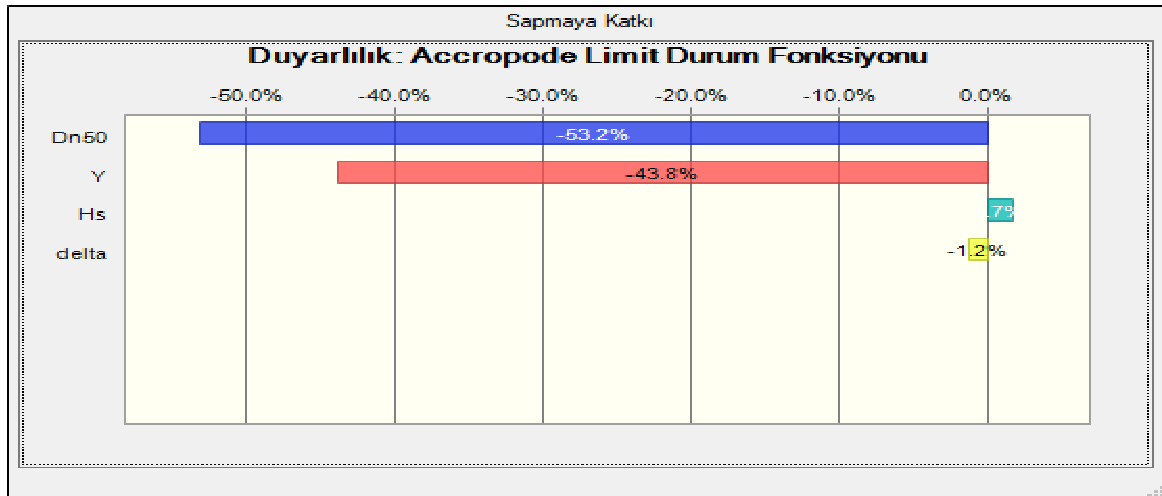
Çizelge 5.1. MCS tarafından modellenen tasarım parametrelerinin ve olasılık dağılımlarının değişimleri

Değişken	Tanım	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma / Ölçek	Dağılım Türü	Dağılım
W_{50} (ton)	Ortalama Tabaka Ağırlığı		28,8		0,05	Modelleme	
H_d (m)	Tasarım Dalga Yüksekliği	7,60	7,70	8,00	0,05	Gumbel	
Dn50 (m)	Koruma tabakasının nominal çapı	2,00	2,28	2,60	0,10	Log-normal	
Δ	Göreceli özgül ağırlık	1,31	1,34	1,37	0,01	Log-normal	
Y (Gövde)	Kritik Stabilite Sayısı	2,20	2,50	2,90	0,10	Log-normal	



Şekil 5.5. Yapının ömrü boyunca (100 yıl) gövde kesiti için Accropode limit durum fonksiyonu %(0-5) ile hasarsızlık düzeyinin geçilme olasılığı.

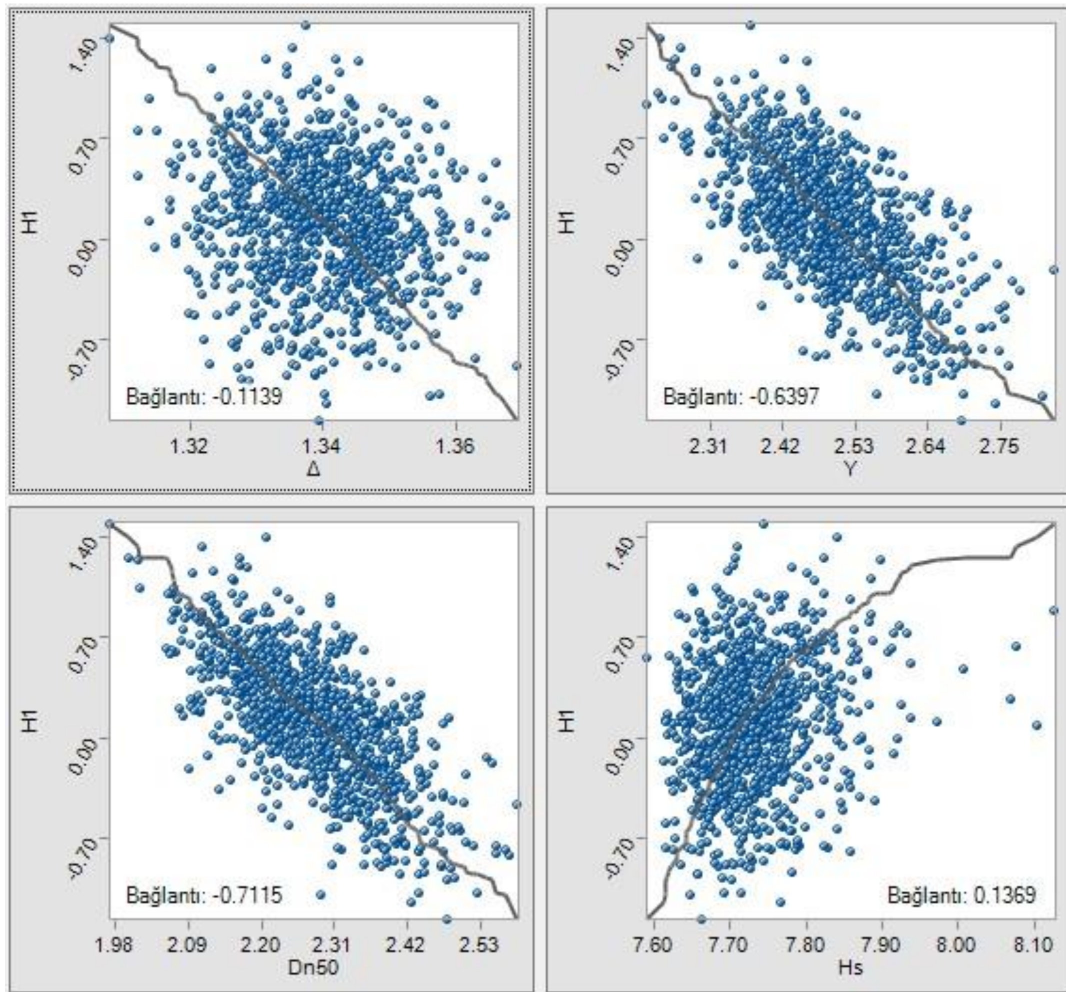
Hassasiyet analizi yoluyla belirlenen en önemli tasarım parametreleri, Şekil 5.6’da sunulmuştur. Şekil 5.6’da görüldüğü üzere Koruma tabaksı nominal çapı (Dn50), yapısal stabiliteyi MCS (Monte Carlo Simülasyonu) yoluyla belirlemede –% 53,20 ile en büyük etkiye sahiptir. Stabilite katsayısı (Y) -% 43,80 ile ikincil büyük etkiye sahip olmaktadır. tasarım dakga yüksekliği (H_s) ve göreceli özgül ağırlık (Δ) sırasıyla % 1,70 ve -% 1,20 düzeyinde yapı stabilitesinde etki sahibidir. Hassasiyet analizi, Monte Carlo simülasyonunda (MCS) rastgele tasarım değişkenlerinin katkısını analiz etmek için uygulanmıştır.



Şekil 5.6. MCS tarafından yapılan Accropode limit durum fonksiyonu duyarlılık analizi (gövde kesiti)

Bu çalışmanın hedeflerinden biri, çeşitli tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Şekil 5.7'deki dağılım diyagramları, kıyı yapısının stabilitesinin tasarım

değişkenleri ile pozitif veya negatif bir ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tasarım stabilite katsayısı (Y), gövde için-0.6397'lik korelasyon değeriyle limit durum fonksiyonunu etkiler. Koruma tabakası nominal çapı (Dn50) -0.7115'lik korelasyon değeriyle limit durum fonksiyonu üzerinde en yüksek etkiye sahiptir. Bu da koruma tabakası boyutundaki sapmaların ve belirsizliklerin limit durum fonksiyonuna oldukça duyarlı olduğunu gösterir. Tasarım dalga yüksekliği yapı stabilitesi üzerinde gövde için 0,1369 büyüklüğünde etkiye sahiptir. Göreceli özgül ağırlık, -0,1139'luk bir negatif etki gösterir. Koruma tabakası boyutu ve tasarım stabilite katsayısı temel değişkenlerdir. (Muttray, 2006) tarafından önerilen Accropode limit durum fonksiyonu, olasılıksal yaklaşımla (MCS) modellendiğinde yapının işletme ömrü boyunca maruz kalacağı dış etkiler altında hasarsız kalabilme olasılığını gövde için %40,951 vermiştir. Onarım maliyeti bütçelendirilmeyecekse % (0-5) hasarsızlık düzeyi aşılabileceğinden Rize-Artvin Havalimanı 12 m³ Accropode II koruma tabakalarının daha yüksek hacimli muadiliyle değişmesi gerekebilir.



Şekil 5.7. Tasarım parametrelerinin saçılım grafiği (gövde kesiti)

(Uğurlu, 2017) tarafından yapılan hidrolik model deneylerinde, Rize-Artvin Havalimanı koruma tabakasının fiziksel modeller sonucu 12 m³ ünitelerle fırtına koşullarında stabil kaldığı bulunmuştur. Uygulamada başka bir koruma tabakası (Xbloc) tercih edilmiş olsa da ünite büyüklükleri benzerdir. Sonuç olarak (Muttray, 2006) tarafından önerilen limit durum fonksiyonu, ön tasarım için yüksek koruma tabakası hacimleri verebildiği (over-design) görülmüştür. Muttray limit durum fonksiyonu ön tasarım sonrasında sayısal model (HAD) ya da hidrolik model deneyleri ile test edilmeli, yatırım ve onarım maliyetlerinin en uygun noktasında (optimum) tasarım gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak, Rize-Artvin Havalimanı koruma tabakasına DEKYAP modeli uygulanmıştır. (Muttray, 2006) tarafından önerilen tek tabaka limit durum fonksiyonları, ön tasarım için yüksek koruma tabakası hacimleri verebilmektedir. Ön tasarım, sayısal (HAD) ya da hidrolik model deneyleri ile test edilmeli, yatırım ve onarım maliyetlerinin en uygun noktasında tasarım gerçekleştirilmelidir.

5.2. Alt model 2: CLI yaklaşımı

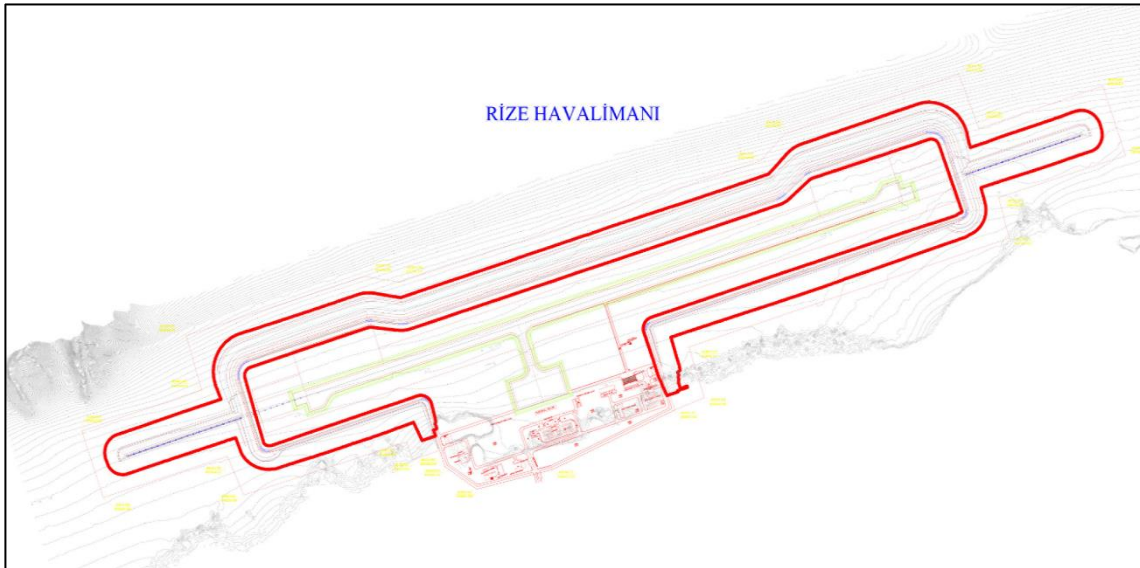
İkinci tek tabaka taş dolgu tasarım alt modeli olan (CLI, 2024) yaklaşımında, verilen değerlere bağlı olarak Hudson limit durum fonksiyonu kullanılmaktadır. Olasılıksal modelde Hudson limit durum fonksiyonu MCS ile benzeştirilmiştir. Tasarım parametrelerine tanımlanan olasılık dağılımları kullanılmıştır. Yapının ekonomik ömrü boyunca tüm çevresel faktörler altında yıkılma olasılığı elde edilmektedir.

Accropode II koruma tabakası için tasarım kataloğunda (CLI, 2024) verilen değerlere bağlı olarak Hudson limit durum fonksiyonu kullanılmıştır. Stabilite değerleri taban eğimine bağlı olarak elde edilmiştir. Taban eğiminin belirlenmesi için Rize-Artvin Havalimanı batimetrisi kullanılmıştır (Şekil 5.8). Taban eğimi %2,50 olarak batimetriden belirlenerek stabilite katsayısı 14 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.9).

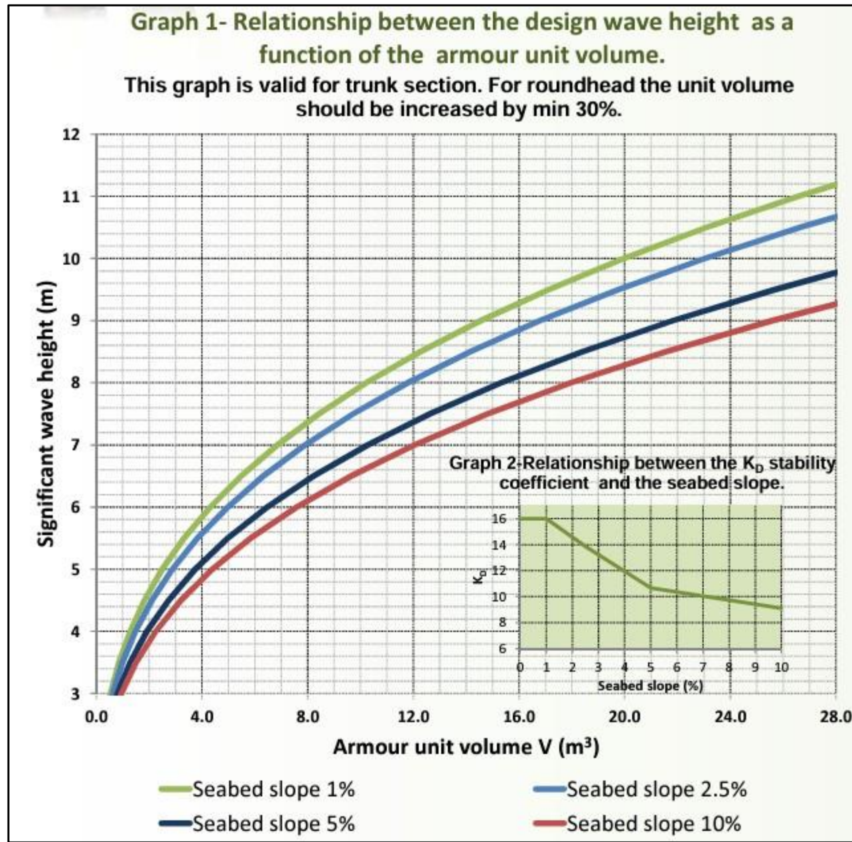
Koruma tabakası hacmi, taban eğimine bağlı olarak Şekil 5.9'dan 11 m³ okunmuştur ancak 11 m³ ürün olmadığı için 12 m³ seçilmiştir (Şekil 5.10). Elde edilen değerler için Hudson limit durum fonksiyonu kullanılarak MCS gerçekleştirilmiştir. Tasarım parametrelerine tanımlanan olasılık dağılımları Çizelge *5.2*'de verilmiştir. Şekil 5.11'de görülebileceği üzere yapının, ekonomik ömrü olan L=100 yıl boyunca % (0-5) hasarsızlık düzeyinin aşılmama olasılığı %96,70'dır.

Hassasiyet analizi yoluyla belirlenen en önemli tasarım parametreleri, Şekil 5.12'de sunulmuştur. Şekil 5.12'de görüldüğü üzere tasarım dakga yüksekliği (H_s), yapısal stabiliteyi MCS (Monte Carlo Simülasyonu) yoluyla belirlemede –% 73,40 ile en büyük etkiye sahiptir. Göreceli özgül ağırlık (Δ) % 18,10 ile ikincil büyük etkiye sahip olmaktadır. Koruma tabaksı nominal çapı (Dn50) ve yapı eğimi (cot α) sırasıyla % 6,30 ve % 2,30 düzeyinde yapı stabilitesinde etki sahibidir. Hassasiyet analizi, Monte Carlo simülasyonunda (MCS) rastgele tasarım değişkenlerinin katkısını analiz etmek için uygulanmıştır.

Şekil 5.13'teki dağılım diyagramları, açık deniz yapısının stabilitesinin tasarım değişkenleri ile pozitif veya negatif bir korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. Tasarım dalga yüksekliği yapı stabilitesi üzerinde gövde için -0,8336 büyüklüğünde etkiye sahiptir. Göreceli özgül ağırlık yapı stabilitesine 0,4204 mertebesinde etki etmektedir. Stabilite katsayısı 0,0146, koruma tabakası nominal çapı 0,2482, yapı eğimi 0,138 ağırlığa sahiptir. Görüldüğü üzere göreceli özgül ağırlık (yapı ağırlığı - kaldırma kuvveti) ve tasarım dalga yüksekliği, yapısal stabiliteyi belirlemede en büyük etkiye sahiptir.



Şekil 5.8. Rize-Artvin Havalimanı Batimetrisi



Şekil 5.9. Taban eğimine bağlı K_D ve ünite büyüklük kataloğu (CLI, 2024)

ACCROPODE™ II - ECOPODE™ Design Guide Table

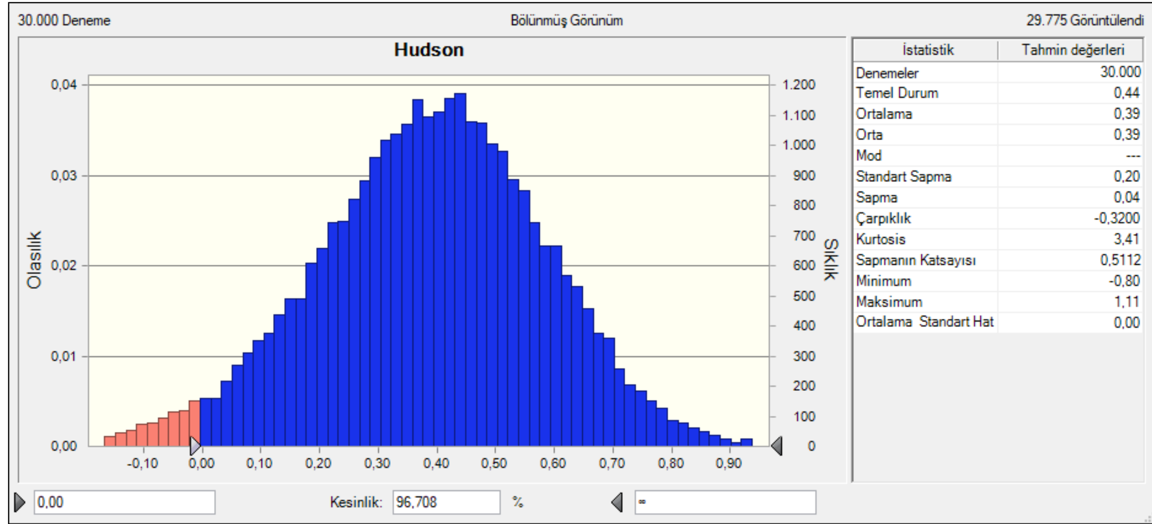
The ECOPODE™ unit size is limited to 10m³

Unit Volume (m³)	V = 0.2926H³		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	28.0
Unit Height (m)	H = (V/0.2926)^(1/3)		1.51	1.90	2.17	2.39	2.58	2.74	3.01	3.25	3.45	3.63	3.80	3.95	4.09	4.22	4.34	4.57
Equivalent Cube Size (m)	Dn = V^1/3		1.00	1.26	1.44	1.59	1.71	1.82	2.00	2.15	2.29	2.41	2.52	2.62	2.71	2.80	2.88	3.04
Armour Thickness (m)	T = 1.36 Dn		1.36	1.71	1.96	2.16	2.33	2.47	2.72	2.93	3.11	3.28	3.43	3.56	3.69	3.81	3.92	4.13
Armour concrete consumption and coverage	Packing density ϕ (-)		0.635	0.635	0.635	0.633	0.631	0.629	0.625	0.622	0.618	0.614	0.610	0.610	0.610	0.610	0.610	0.610
	Consumption (m³/m²)		0.635	0.800	0.916	1.005	1.079	1.143	1.251	1.339	1.414	1.479	1.537	1.599	1.656	1.709	1.760	1.852
	Number of units (u/m²)		0.635	0.400	0.305	0.251	0.216	0.191	0.156	0.134	0.118	0.106	0.096	0.089	0.083	0.078	0.073	0.066
	Porosity (%)		53.31	53.31	53.31	53.45	53.59	53.73	54.02	54.30	54.58	54.86	55.15	55.15	55.15	55.15	55.15	55.15
Filter stone underlayer - to meet the following requirement NUL/NLL < 3.0	NLL (tons)	Standard	0.17	0.34	0.50	0.67	0.84	1.01	1.34	1.68	2.02	2.35	2.69	3.02	3.36	3.70	4.03	4.70
		Min/Max*	0.1 0.2	0.2 0.4	0.4 0.7	0.5 0.9	0.6 1.1	0.7 1.3	0.9 1.7	1.2 2.2	1.4 2.6	1.6 3.1	1.9 3.5	2.1 3.9	2.4 4.4	2.6 4.8	2.8 5.2	3.3 6.1
	NUL (tons)	Standard	0.34	0.67	1.01	1.34	1.68	2.02	2.69	3.36	4.03	4.70	5.38	6.05	6.72	7.39	8.06	9.41
		Min/Max*	0.2 0.4	0.5 0.9	0.7 1.3	0.9 1.7	1.2 2.2	1.4 2.6	1.9 3.5	2.4 4.4	2.8 5.2	3.3 6.1	3.8 7.0	4.2 7.9	4.7 8.7	5.2 9.6	5.6 10.5	6.6 12.2
	Thickness (m) for standard NLL&NUL Specific density 2,6 t/m3	Kt=1,15	1.06	1.33	1.52	1.68	1.81	1.92	2.11	2.28	2.42	2.55	2.66	2.77	2.87	2.96	3.05	3.21
		Kt=0.9*	0.83	1.04	1.19	1.31	1.41	1.50	1.65	1.78	1.89	1.99	2.08	2.17	2.24	2.32	2.38	2.51

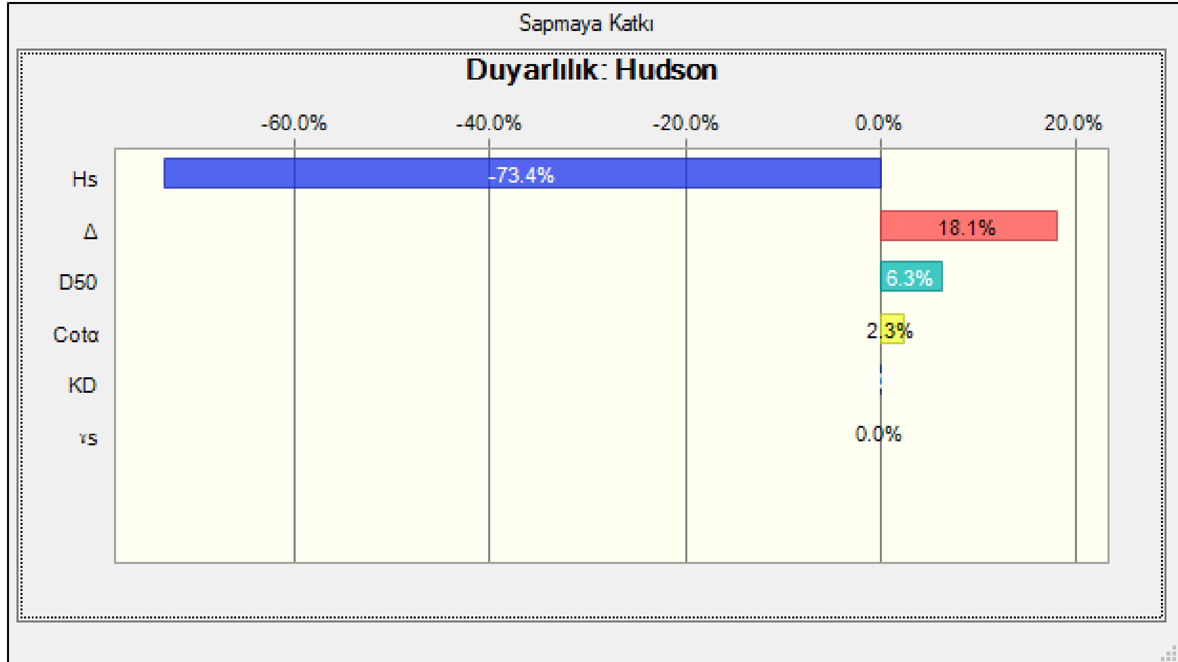
Şekil 5.10. Accropode II tasarım kataloğu (CLI, 2024)

Çizelge 5.2. MCS tarafından modellenen tasarım parametrelerinin ve olasılık dağılımlarının değişimleri

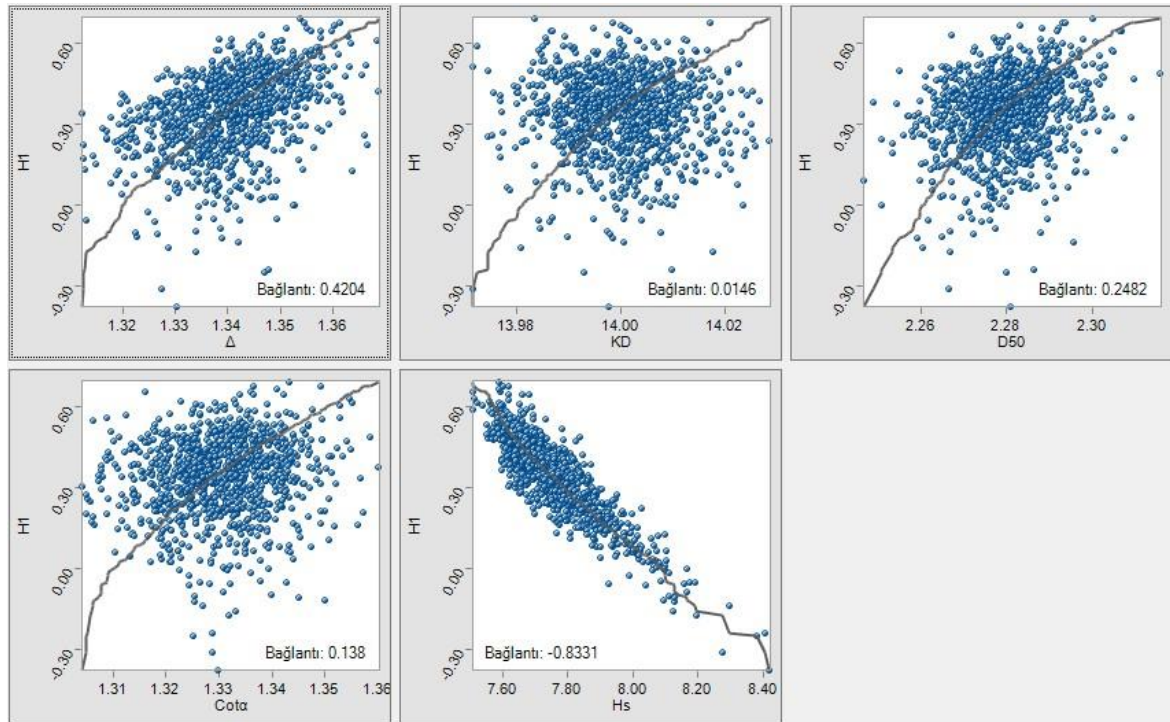
Değişken	Tanım	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma / Ölçek	Dağılım Türü	Dağılım
W_{50} (ton)	Ortalama Tabaka Ağırlığı		28,8		0,05	Modellendi	
H_d (m)	Tasarım Dalga Yüksekliği	7,50	7,70	8,2	0,10	Gumbel	
Dn50 (m)	Koruma Tabakası Nominal Çapı	2,25	2,28	2,31	0,01	Log-normal	
K_D	Stabilite Katsayısı	13,97	14	14,03	0.01	Log-normal	
Cotα	Yapı Eğimi	1,30	1,33	1,36	0,01	Log-normal	
Δ	Göreceli özgül ağırlık	1,31	1,34	1,37	0,01	Log-normal	



Şekil 5.11. Yapının ömrü boyunca (100 yıl) gövde kesiti için Hudson limit durum fonksiyonu %(0-5) hasarsızlık düzeyinin aşılma olasılığı.



Şekil 5.12. MCS tarafından yapılan Accropode II limit durum fonksiyonu duyarlılık analizi

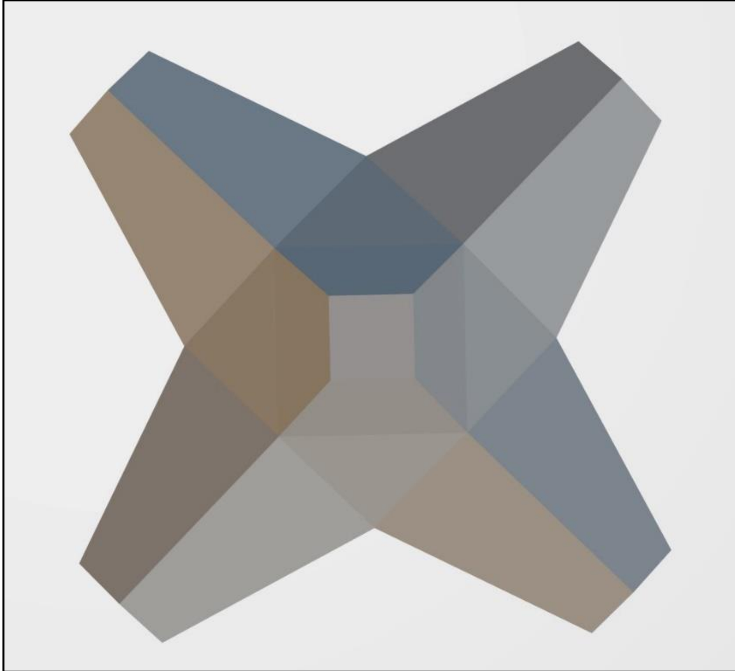


Şekil 5.13. Tasarım parametrelerinin saçılım grafiği (gövde kesiti)

6. DALGAKIRANLAR İÇİN TEK SIRA KORUMA TABAKASI (Piblok+) GELİŞTİRİLMESİ VE DEKYAP MODEL UYGULAMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde ülkemizin ilk tek sıra koruma tabakasının geliştirilmesi sürecine odaklanılmıştır. Tek sıra koruma tabakaları, kilitlenme (interlocking) ve tek parça hâlinde davranışları (monolitik) ile diğer koruma tabakalarından ayrılmaktadır. Bu duruma ek olarak malzeme kullanımını ciddi şekilde azaltması ile de ön plana çıkmaktadır. Bu sebeplerden dolayı dünyada son yıllarda tek sıra koruma tabakası çalışmaları, değişik ülkelerde hızla devam etmektedir. Ülkemizin de kıyı mühendisliğinin en önemli konularından biri olan tek sıra koruma tabakası geliştirilmesi sürecinde yer alması amacı ile Piblok+ geliştirme çalışmaları başlatılmıştır.

Fikir çalışmaları 2017 yılında Prof. Dr. Can Elmar BALAS, Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN ve Arif UĞURLU tarafından başlatılan geliştirme projesinde, Piblok+ patent başvurusu 2022 yılında yapılmıştır (Ugurlu vd., 2022). Türkiye Patent ve Marka Kurumu tarafından Piblok+ tek kat koruma tabakasına 25.01.2024 tarihinde patent verilmiştir (C. E. Balas vd., 2024). Patent çalışmaları tamamlanan tek sıra koruma tabakası Şekil 6.1'de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Tezde geliştirilen Piblok+ tek sıra koruma tabakası

Geliştirme sürecinin ilk aşaması olarak numerik analiz çalışmaları yürütülmüştür. Numerik analiz, HAD yöntemi ile FLOW 3D programında gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı analiz için Rize-Artvin Havalimanı dalgakıranı kullanılmıştır.

Üç boyutlu sayısal model olan Flow-3D 3 boyutlu Navier-Stokes denklemlerini çözmektedir (Basu et al., 2009). Navier-Stokes denklemleri akışkanların üç boyutlu hareketini tanımlar. Bu denklemler, bir akışkanın hız alanının zaman içinde nasıl evrildiğini tanımlayan lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin kümesidir. Sıkıştırılamaz sıvılar için Navier-Stokes denklemleri aşağıda gösterilmektedir.

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6.1)$$

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6.2)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (6.3)$$

Burada u hız alanını temsil etmektedir. Hız alanı u = (u, v, w), sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini temsil eder. Navier-Stokes denklemlerini çözmek için hız alanının başlangıç ve sınır koşulları tanımlanır.

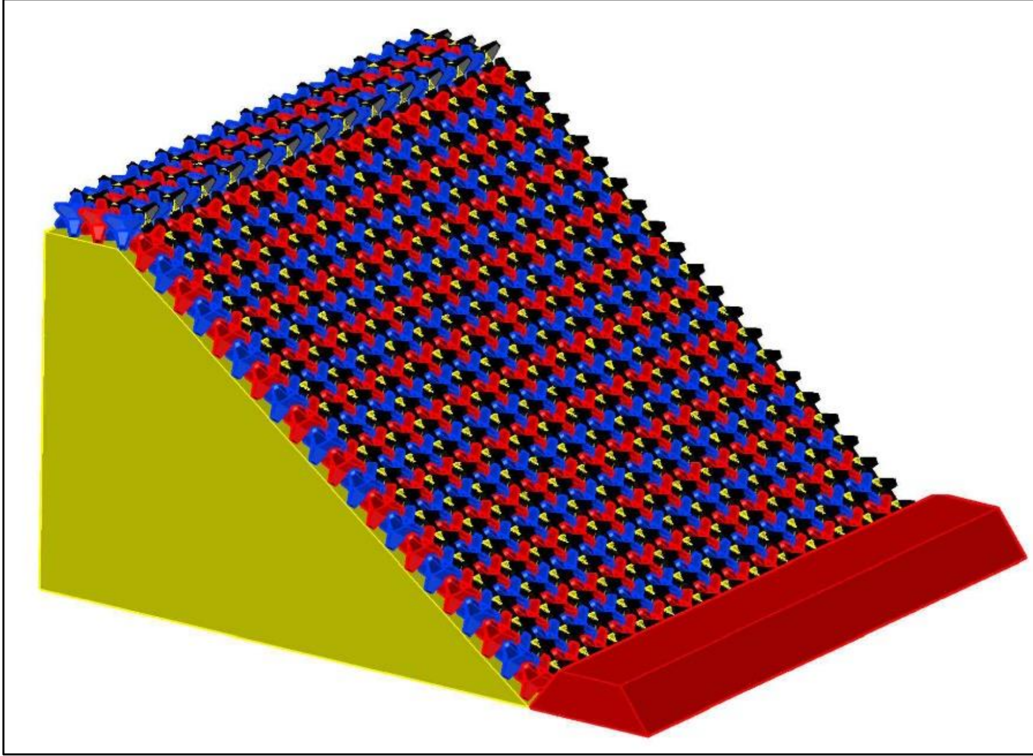
FLOW-3D, türbülanslı akışları modellemek için çeşitli türbülans modellerine sahiptir. Bunlar arasında Prandtl karışım uzunluğu modeli, tek denklem modeli, çift denklem k-ε modeli, RNG şeması ve LES modeli bulunmaktadır (Basu vd., 2009). Modellemeler kapsamında K-epsilon (k-ε) türbülans modeli kullanılmıştır. K-epsilon türbülans modeli, türbülanslı akış koşullarında ortalama akış karakteristiklerini modellemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde en yaygın kullanılan modellerden biridir.

(Uğurlu, 2017) tarafından yapılan çalışmada Rize-Artvin Havalimanı dalgakıranı, Accropode II tek sıra koruma tabakası ile hidrolik model deneyleri ile test edilmiştir. Piblok+ ile elde edilen sayısal modelleme sonuçları, Accropode II ile elde edilen fiziksel deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Fiziksel ve sayısal modellerin karşılaştırılması için Accropode II ile yapılan fiziksel model, HAD yöntemiyle yeniden analiz edilmiştir.

Accropode II fiziksel modellerinin yapılmış olduğu dalga havuzu Şekil 6.2'de görülmektedir.

Piblok+ koruma tabakasına ait HAD modellemesi başlamadan önce yapı, Autocad-3D'de çizilmiş ve [.stl] formatında kaydedilmiştir (Şekil 6.3). Bu işlemin ardından [.stl] dosyası, FLOW-3D'ye giriş verisi olarak yüklenmiş ve Accropode II ile aynı koşullar altında sayısal olarak analiz edilmiştir. Bir kıyı yapısının dalgakıranı için stabilite ve aşma en önemli özelliklerdir. Her iki koruma tabakası da bu koşullar için test edilmiştir.

Şekil 6.2. Fiziksel model çalışmaları için kullanılan dalga havuzu

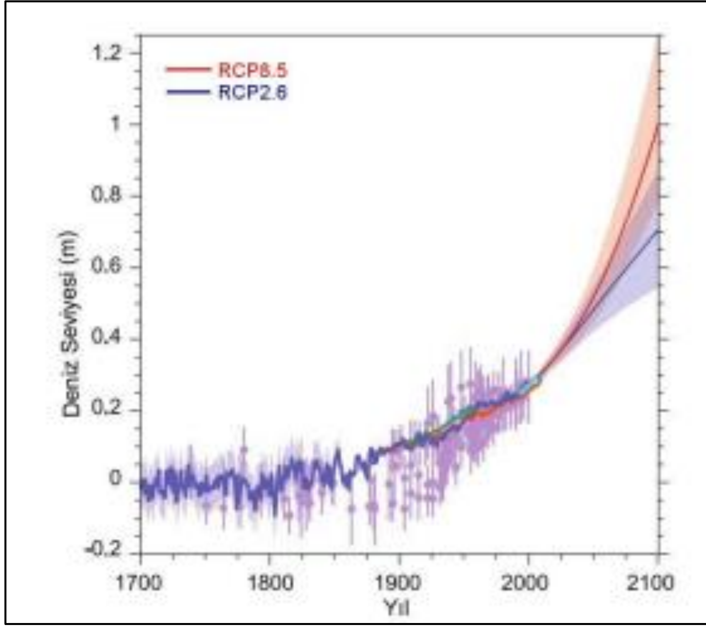


Şekil 6.3. Piblok+ tek sıra koruma tabakası dizilimi

Yapının ekonomik ömrü boyunca (L=100 yıl) karşılaşacağı en önemli doğa olaylarından biri, deniz seviyesi değişimidir. Bu nedenle deniz seviyesi değişimi de hesaplanarak FLOW 3D'ye giriş verisi olarak yüklenmiştir. Deniz seviyesi değişimine etki eden en önemli unsur, iklim değişikliğidir. Kümülatif deniz seviyesi değişimi için (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016) kullanılmıştır. Seviye değişimine etki eden faktörler :

- İklim Değişikliği
- Rüzgâr Kabarması
- Dalga Kabarması
- Mevsimsel gelgitler, barometrik etki ve Coriolis etkisidir.

İklim değişikliği sınır senaryoları olan RCP8.5 ve RCP2.6, %5 - %95 güven aralığında Şekil 6.4'te gösterilmektedir. 2007-2100 yılları arasındaki deniz seviyesi artışının en kötü RCP8.5 senaryosu için 0,53–0,98 m, en iyi RCP2.6 senaryosu için 0,28–0,61 m olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Yıllara bağlı iklim değişikliği nedeniyle deniz seviyesi değişimi

Rüzgâr kabarması için Eşitlik 6.1 kullanılmıştır (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016). Bu denklemden Rize-Artvin Havalimanı'nın inşa edileceği lokasyon için F=330 km, d=1300 m, 100 yıllık dönüş periyodu için rüzgâr hızı u=37 m/sn ile η0=16,7 cm rüzgâr kabarma değeri bulunur.

$$\eta_0 = k\frac{F}{d}\,(U\cos\Theta)^2 \tag{6.4}$$

F : Dalga kabarma (feç) uzunluğu (km)

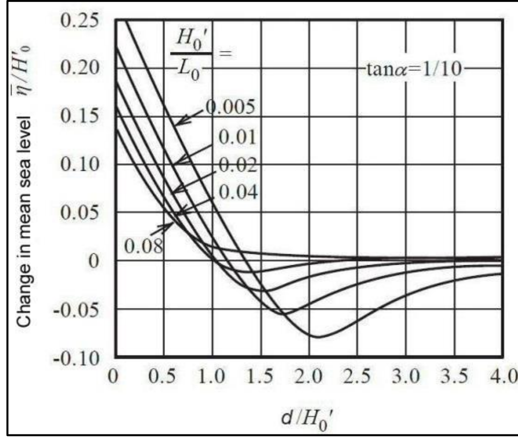
U : Sabit rüzgâr hızı (m/s)

d : Ortalama su derinliği (m)

k büyüklüğü, açıklığın karakteristiğine göre değişen bir katsayıdır (OCDI, 2003). Baltık Denizi’nden elde edilen araştırma sonuçlarına göre k değeri 4.8 x 10^{-2} olarak belirlenmiştir.

Dalga kabarması için (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016) kullanılmıştır. Şekil 6.5'te Rize-Artvin Havalimanı'nın 100 yıllık dönüş periyotlu tasarım dalgası (Hs = 7.70 m

Tm=11.0 s) ve yapı önündeki ortalama derinlik d = -25 m dikkate alındığında η = 7.2 cm dalga kabarması beklenir.



Şekil 6.5. Dalga kabarmasının yapı önü derinliği ve dalga yüksekliğine bağlı değeri

Mevsimsel gelgitler, barometrik ve Coriolis etkileri için (Uğurlu, 2017) kullanılmıştır. Coriolis etkisi, Dünya'nın dönüşünden kaynaklanan ve hareket eden cisimlerin yörüngelerinde sapmalara neden olan bir kuvvettir. Bu etki, özellikle büyük ölçekli akıntılarda belirgin olup, kuzey yarımkürede hareket eden cisimlerin sağa, güney yarımkürede ise sola sapmasına yol açar.

Çizelge 6.1'de görüldüğü üzere Karadeniz için mevsimsel gelgitler, barometrik etki ve Coriolis etkisi ile deniz seviyesi değişimi, -12 cm ile +16,5 cm arasında değişmektedir.

Çizelge 6.1. Mevsimsel gelgitler, barometrik etki ve Coriolis etkisi ile deniz seviyesi değişimi

	Karadeniz	Marmara Denizi	Ege Denizi	Akdeniz
Mevsimsel Gel-gitler	-9.5 – +9.5 cm	-9 – +9 cm	-8.5 – +8.5 cm	-4 – +4 cm
Barometrik ve Coriolis Etkisi	-2.5 – +7.0 cm	-2.4 – +12 cm	-2.4 – +6.7 cm	-1.9 – +6.2 cm
Toplam	-12 – +16.5 cm	-11.4 – +21 cm	-10.9 – +15.2 cm	-5.9 – +10.2 cm

Gelgitlere bağlı su seviyesi değişimlerini belirlemek için Harita Genel Komutanlığına ait Trabzon Mareograf İstasyonundan alınan veriler kullanılmıştır. Bu verilerde gelgit etkisine bağlı su seviyesi değişimi, yıllık ortalama günlük en yüksek 18 cm olarak verilmiştir. Tüm bu hesaplamalar sonucunda yapının ömrü boyunca karşılaşacağı (önümüzdeki 100 yıl) toplam en yüksek ortalama deniz seviyesi değişimi, ΔMHWL (max)=131,4 cm olarak bulunmuştur. Bu değere Harita Genel Komutanlığına ait Trabzon Mareograf istasyonundan alınan yıllık ortalama günlük en yüksek su seviyesi değişim olan 18 cm de dahildir. Deniz seviyesi değişim değerleri HYDROTAM 3D iklim değişikliği modülü kullanılarak kontrol edilmiş, maksimum ve ortalama deniz seviyesi değişimleri MCS'da modellenen olasılık dağılımlarının aralığında kullanılmıştır.

CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), birleştirilmiş atmosfer-okyanus genel çevrim modellerinin çıktısını incelemek için standart deneysel çerçevenin altıncı fazıdır. İklim değişiminden nasıl etkileneceğini belirlemek için CMIP6 modellerinden olan CNRM-CM6-1 iklim değişikliği modeli Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nce Türkiye için uygulanmış, SSP2 4.5 ve SSP5 8.5 senaryolarına göre 2041-2060 ve 2081-2100 dönemleri denizlerimizde beklenen su seviyesi değişimleri belirlenmiştir. CMIP6 GCM modeli karşılaştırma projesinin ilk sonuçları, CMIP5 modellerine göre 21. yüzyılda daha büyük bir sıcaklık artışı ortaya çıkarmıştır. CMIP6 SSP585 senaryosu, +1,3°C daha büyük Arktik güçlendirme ile ilişkili bulut ve deniz buzu geri bildirimlerini ana itici güçler olarak belirlemiştir. Bu durumda CMIP6'daki GrIS kütle kaybı, küresel ışınım zorlamasının iki katı olan bir CMIP5 senaryosuna eşdeğerdir (Dufresne vd., 2013).

İklim değişikliği ve olası afet tehlikeleri çerçevesinde senaryo analizleri Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nce Türkiye için yapılmıştır. İklim değişikliğinin sonuçlarına hazırlıklı olunması ve olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi için iklimde gözlenen değişikliklerin ve eğilimlerin gelecekte nasıl olacağının tahmin edilmesi ve bu değişikliklerin doğal sistemler ile insan sistemlerine etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Modeller ile elde edilen geleceğe yönelik iklim öngörülerinde değişik senaryolar kullanılmaktadır. Bu senaryolar, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) adlı Birleşmiş Milletlerin Dünya Meteoroloji Teşkilatı tarafından hazırlanmış ve Emisyon Senaryoları Özel Raporu (SRES) olarak yayımlanmıştır.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, iklim değişikliğinin gelecekte ülkemizi nasıl etkileyeceğini ortaya koyabilmek amacıyla 2016-2099 dönemi için 3 farklı küresel model ile iklim projeksiyonları geliştirmiştir. Çalışmada HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR (Lin-Ye vd., 2018), GFDL-ESM2M küresel model veri setleri kullanarak RegCM4.3.4 Bölgesel Modeli ile dinamik ölçek küçültme yöntemiyle RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 1971-2000 referans periyotlu; 2016-2040, 2041-2070, 2071-2099 gelecek periyotlu, 20 km çözünürlüklü, Türkiye ve bölgesi için projeksiyon sonuçları elde edilmiştir (Collins et al., 2008).

İklim modeli olarak CNRM/CERFACS modelleme grubu tarafından geliştirilen CNRM-CM6-1 kullanılmıştır. Çalışmada senaryo olarak Hükümetler Arası İklim Değişikliği Panelinin VI. Değerlendirme Raporu'ndaki (IPCC6) daha geniş bir gelecek tahmini sağlamak amacıyla CMIP6 için bir dizi yeni senaryo oluşturulmuş ve Çizelge *6.2*'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2. Temsili Konsantrasyon Rotaları (Representative Concentration Pathways - RCP) Senaryoları (Klimatoloji Şube Müdürlüğü, 2022)

RCP	Radyoaktif Etki (W/m^2)	Zaman	Radyoaktif Etki Değişimi	2100 Yılı Toplam Konsantrasyon (CO_2 eşdeğeri ppm)	Emisyonlar (Sera gazları)
RCP 8.5	>8.5	2100	Yükselme	1370	Artış
RCP 6.0	6.0	2100 sonrası	Stabilizasyon	850	Son çeyrekte düşüş
RCP 4.5	4.5	2100 öncesi	Stabilizasyon	650	Orta çeyrekte düşüş
RCP 3-PD	3.0	2100 öncesi	Düşüş	490	İlk çeyrekte düşüş

Çizelge *6.2*'de küresel emisyonlar ile küresel ortalama değişim senaryolarının (Van Vuuren vd., 2011) ve IPCC AR5 senaryolarının (Clarke et al., 2014) karşılaştırılması (O'Neill vd., 2016) görülmektedir. Bu senaryolar Shared Socioeconomic Pathways olarak (SSPS) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 ve SSP5-8.5 şeklinde ifade edilmektedir.

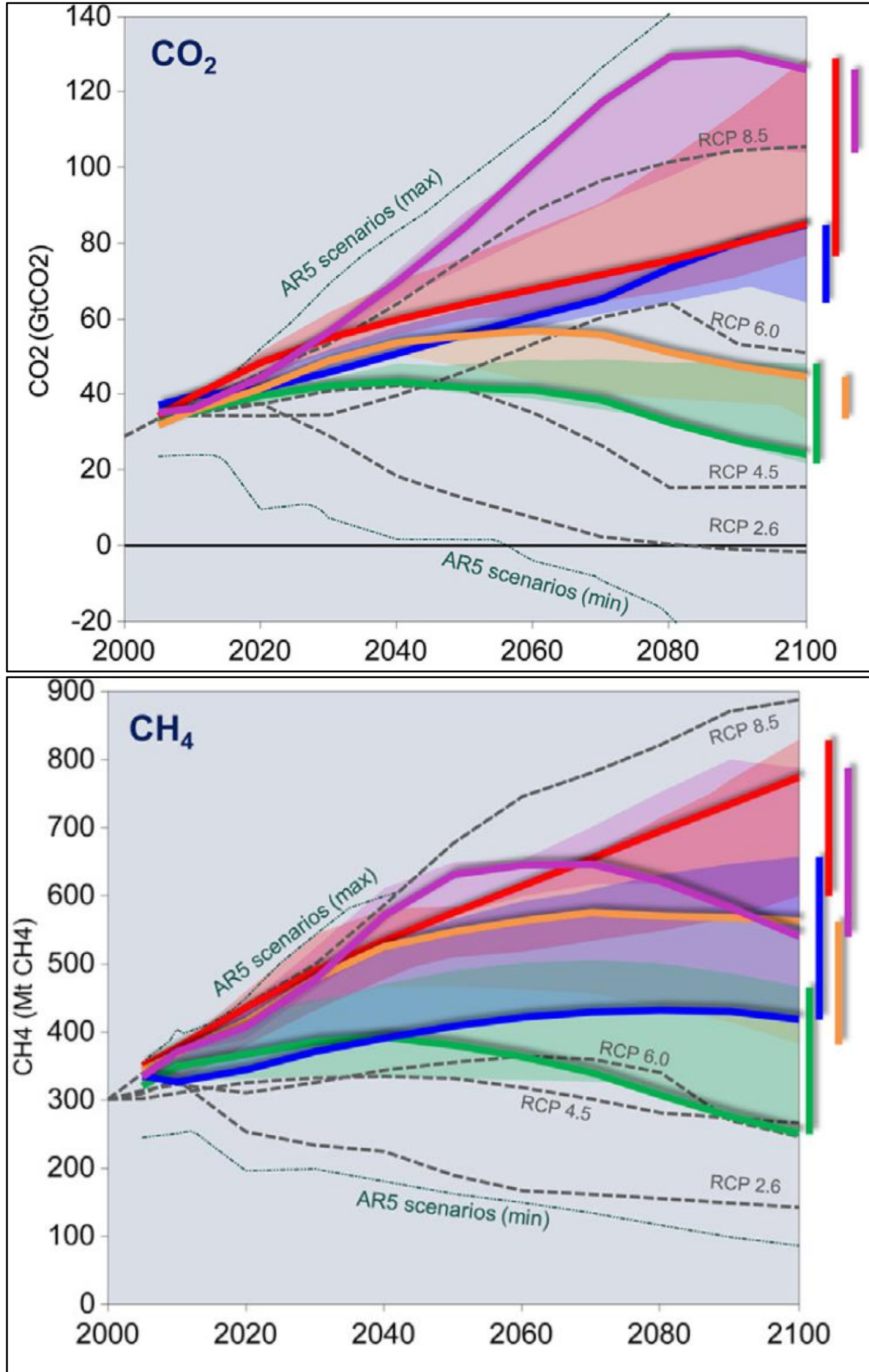
Bu çalışmada SSP2 4.5 ile SSP5 8.5 senaryolarına ait 2041- 2060 ile 2081-2100 dönemleri değerlendirilmiştir. RCP4.5'e göre Türkiye yıllık ortalama sıcaklık aykırılık bandı kestirimleri, Şekil 6.6'de verilmektedir (Klimatoloji Şube Müdürlüğü, 2022). RCP4.5

senaryosuna göre 2016-2099 döneminde, Türkiye yıllık ortalama sıcaklıklarının yaklaşık olarak 1,5 – 2,6 °C aralığında artması beklenmektedir.

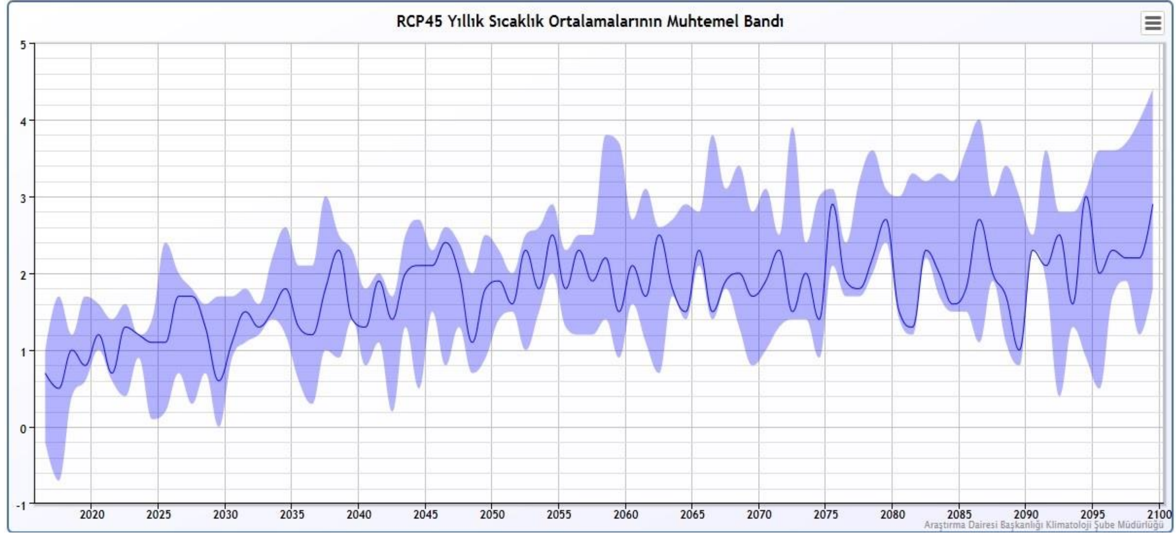
Ortalama sıcaklığın yüzyılın ilk yarısında -0,9 ile 4,1°C aralığında olması ve yıllık ortalama sıcaklıkların ortalama olarak 1,4°C artması, yüzyılın ikinci yarısında ise 0,6 ile 4,1°C aralığında artış ve ortalama olarak 2,2°C artması öngörülmektedir. Şekil 6.7 HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M modellerinin Türkiye geneli için yıllık ortalama sıcaklık aykırılıklarından oluşturulmuştur. RCP8.5'e göre Türkiye yıllık ortalama sıcaklık aykırılık bandı projeksiyonları Şekil 6.8'te sunulmuştur.

HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M modellerinin Türkiye geneli için RCP4.5'e göre yıllık ortalama sıcaklık aykırılıkları oluşturulmuştur. Her yıl için üç model içerisindeki en düşük aykırılık ve en yüksek aykırılık aralığı, bant genişliğini ifade eder. Ortanca değer, (medyan) çizgi olarak belirtilmiştir.

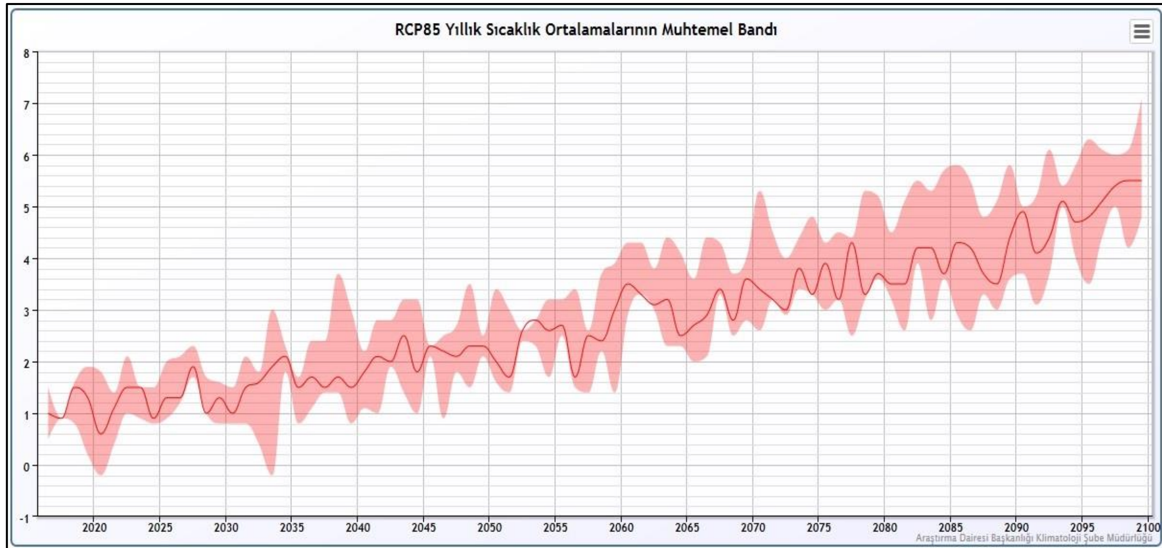
Çizimlerde her yıl için 3 model içerisindeki en düşük aykırılık ve en yüksek aykırılık aralığı bant genişliğini ifade ederken ortanca değer (medyan) çizgi olarak belirtilmiştir. RCP8.5 senaryosuna göre 2016-2099 döneminde, Türkiye yıllık ortalama sıcaklıklarının ortalama olarak 2,5 – 3,7 °C aralığında artması beklenmektedir. Ortalama sıcaklık aykırılığının yüzyılın ilk yarısında -0,4 ile 3,8°C aralığında olması ve yıllık ortalama sıcaklıkların ortalama olarak 1,7°C artması, yüzyılın ikinci yarısında ise 1,4 ile 6,6°C aralığında artış ve ortalama olarak 3,8°C artması öngörülmektedir. Buna göre kıyı bölgelerindeki senaryo çalışmaları da 1992'de düzenlenen Uluslararası Su ve Çevre Konferansı'nda kabul edilen Dublin Bildirgesi'ne (Dublin Statement) göre gerçekleştirilmiştir. HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M modellerinin Türkiye geneli için RCP8.5'e göre yıllık ortalama sıcaklık aykırılıkları oluşturulmuştur. Her yıl için üç model içerisindeki en düşük aykırılık ve en yüksek aykırılık aralığı, bant genişliğini ifade eder. Ortanca değer (medyan) çizgi olarak belirtilmiştir.



Şekil 6.6. Küresel emisyonlar ile küresel ortalama değişim senaryolarının (Van Vuuren et al., 2011) ve IPCC AR5 senaryolarının (Clarke et al., 2014) karşılaştırılması (O’Neill et al., 2016)

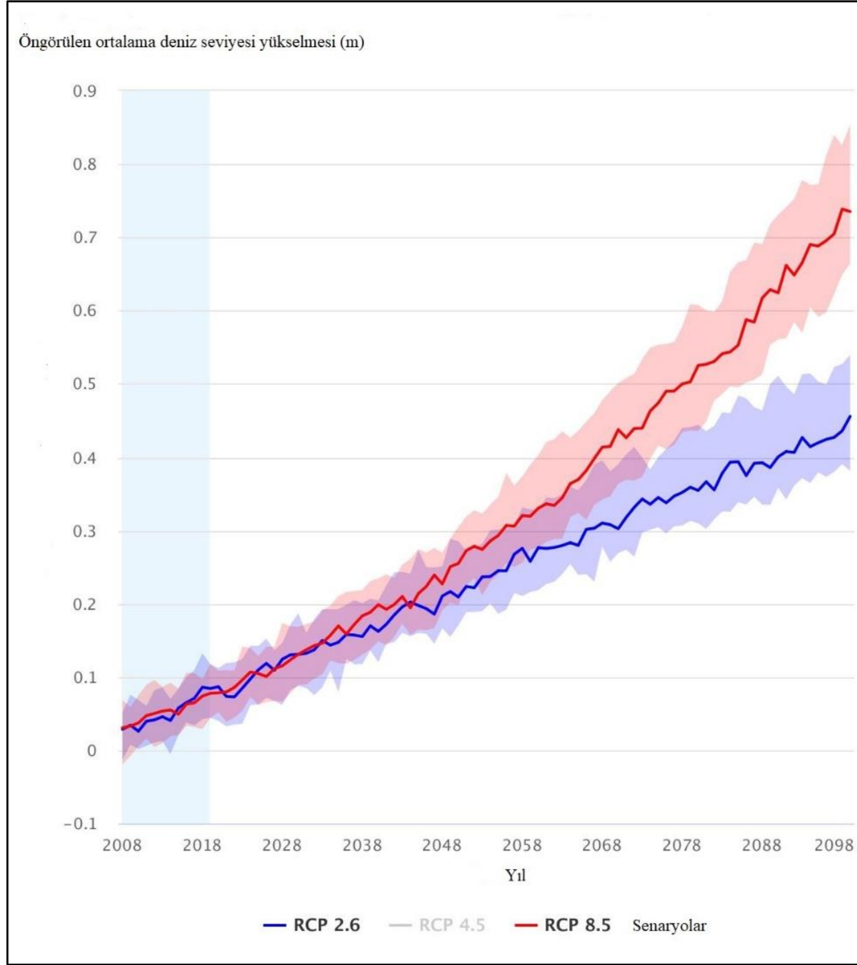


Şekil 6.7. RCP4.5’e göre Türkiye yıllık ortalama sıcaklık aykırılık bandı kestirimleri (Klimatoloji Şube Müdürlüğü, 2022)



Şekil 6.8. RCP8.5`e göre Türkiye yıllık ortalama sıcaklık aykırılık bandı projeksiyonları (Klimatoloji Şube Müdürlüğü, 2022)

Tarihsel Deniz Yüzeyi Sıcaklıkları ve Tarihsel Deniz Seviyesi Anomalilerinin (uydu gözlemleri) verileri ile kalibre edilen model tabanlı Ortalama Deniz Seviyesi Yükselişi Projeksiyonları Şekil 6.9’da sunulmaktadır.



Şekil 6.9. Öngörülen senaryolara göre ortalama deniz seviyesi artış projeksiyonları (Dünya Bankası İklim Değişikliği Bilgi Portalı, 2022)

Çizelge 6.3. Rize deniz alanında oluşması beklenen Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) Ortalama Su Seviyesinden (MWL) RCP8.5'e göre en yüksek ve en düşük su seviyesi değişimleri (SSD) (Balas Egemen Ander & Balas Lale, 2023b; L. Balas, 2022)

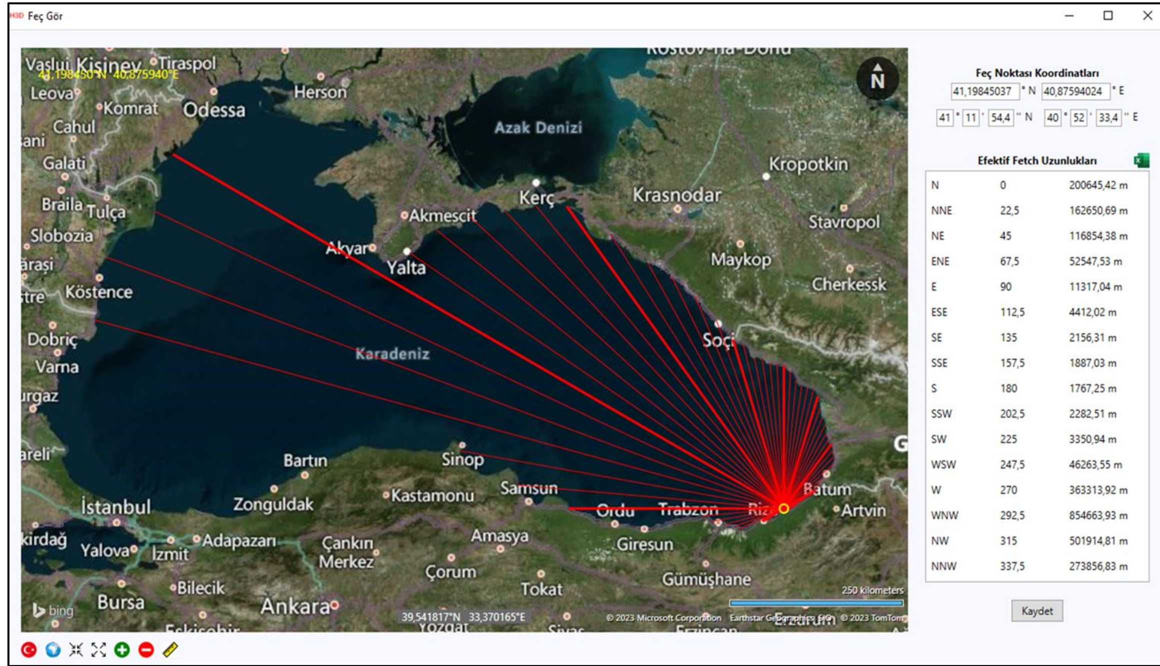
Denizel Alan	100 yıl sonra Beklenen Su Seviyesi Artışı (cm) ΔMHWL	Beklenen En Düşük Su Seviyesi Artışı (cm)ΔCSLR
Rize deniz alanı	117	71

Tasarım su seviyesi analizi yapılarak yapı önü tasarım dalgalarının belirlenmesinde, en düşük ve en yüksek su seviyeleri için RCP8.5 iklim değişikliği senaryosu dikkate alınmıştır. Ek olarak rüzgâr kabarması, gelgit etkisi ve fırtına kabarması etkileri hesaba katılmıştır. Deniz yüzeyinde rüzgâr etkenli kayma gerilmelerinin su düzeyinde meydana getirdiği değişime, rüzgâr kabarması adı verilir. Rüzgâr kabarmasında rüzgâr ve basınç kuvvetleri,

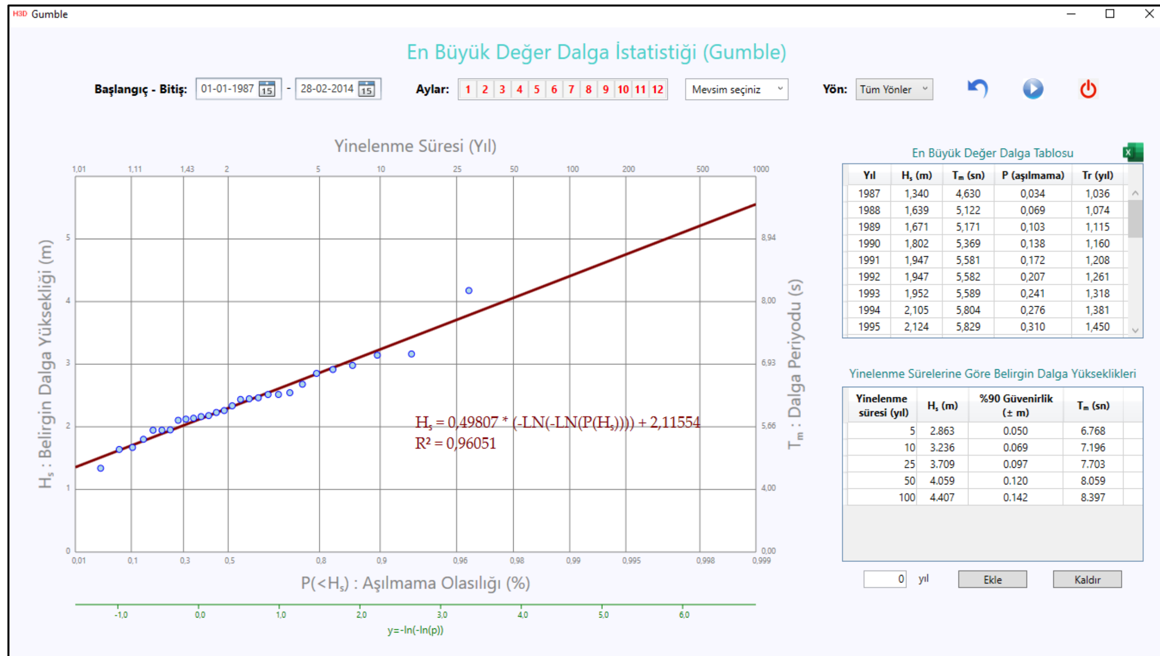
suyu kıyıya doğru itmektedir. Rüzgâr kabarması, gelgit etkisi ve dalga kabarması, kümülatif olarak dikkate alınmış ve Rize deniz alanı kıyı yapılarının tasarım su seviyesinin belirlenmesi için modellenmiştir.

HYDROTAM-3D modellemesi (Balas Egemen Ander ve Balas Lale, 2023a) sonucunda yönlere göre, TUDES ortalama su seviyesinin (MWL) üzerinde oluşması beklenen RCP8.5'e göre en yüksek ve en düşük su seviyesi değişimleri Çizelge *6.3*'te verilmiştir. Rize kıyılarında 100 yıl sonra beklenen RCP8.5 Su Seviyesi Artışı (**Δ**MHWL) 117 cm olarak tahmin edilmiştir. Rüzgâr kabarması, gelgit etkisi ve dalga kabarması, kümülatif olarak verilen senaryo değeri içindedir. Modelde olasılık dağılımın aralıkları (Uğurlu, 2017) ve HYDROTAM-3D kullanılarak elde edilen su seviyesi değişim aralığı ile tanımlanmıştır.

Deniz seviyesi değişiminin MCS'de modellenmesini müteakip yapısal tasarımın en önemli bileşeni olan tasarım dalgasının elde edilmesi safhasına geçilmiştir. Tasarım dalgası HYDROTAM-3D yazılımı ile elde edilmiştir. Elde edilen dalga yüksekliği, giriş verisi olarak FLOW-3D yazılımına yüklenmiştir. Tasarım dalgası bulunmasının ilk etabı, inşaat sahasının dalga kabarma mesafesinin HYDROTAM-3D (HYDROTAM-3D, 2023) yazılımı ile bulunmasıdır. Şekil 6.10'da görüldüğü üzere en uzun dalga kabarma mesafesi 854,6 km ile WNW yönüdür. Feç mesafesinin hesaplanması sonrası HYDROTAM-3D ile Rize Pazar Meteoroloji İstasyonu verileri ve ECMWF Operasyonel Arşiv (41.2° N - 40.9° E) verileri karşılaştırılmıştır. Şekil 6.11'de görüldüğü üzere Rize Pazar Meteoroloji İstasyonu verilerinden 100 yıl dönüş periyotlu tasarım dalgası, % 90 güven aralığı ile 4,46 m elde edilmiştir. Şekil 6.12'de HYDROTAM-3D yazılımının ECMWF Operasyonel Arşiv için oluşturulan çözüm sayfası verilmiştir. Şekil 6.12'de yüklenen verilere bağlı olarak ECMWF Operasyonel Arşiv (41.2° N - 40.9° E)'den elde edilen 100 yıl dönüş periyotlu tasarım dalgası, Şekil 6.13'te verilmiştir. Buradan elde edilen değer, %90 güven aralığı ile 7,74 m'dir. Bu değer, (Uğurlu, 2017) 'de elde edilen tasarım dalga yüksekliği ile uyumludur.



Şekil 6.10. Rize-Artvin Havalimanı dalga kabarma (feç) mesafesi

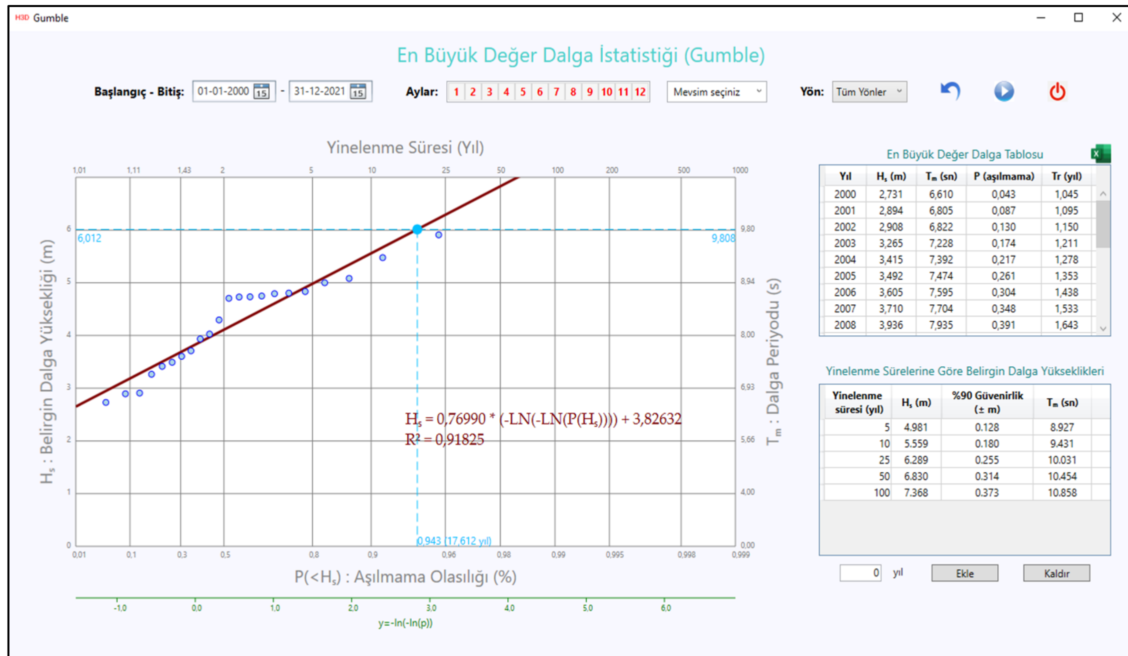


Şekil 6.11. Rize Pazar Meteoroloji İstasyonundan HYDROTAM-3D ile elde edilen en büyük değer dalga istatistiği (Gumble dağılımı)

H3D Çözüm Düzenle

Proje Çalışma Noktası: RİZE
Dalga Veri Kaynağı: Model
CEM Parametreleri
Dalga Tahmin Yöntemi: Ampirik
Çalışma Noktası: RİZE
Batimetri: Pazar-Batum
Rüzgar Veri Seti: ECMWF Operasyonel Arşiv 0.1° (Akdeniz)
Rüzgar Veri İstasyonu: 41,2°N - 40,9°E
Başlangıç - Bitiş: 01-01-2000 – 31-12-2021
Aylar: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Mevsim seçiniz
Ad: RİZE
Açıklama:
Kıyı Segmentleri
Güncelle
Vazgeç

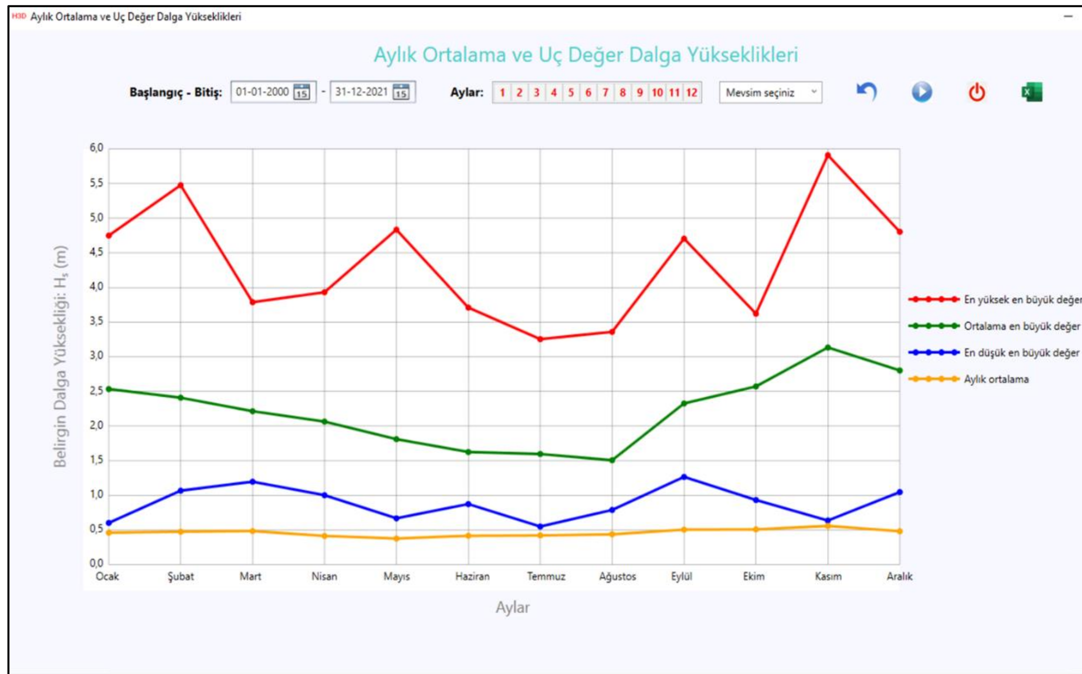
Şekil 6.12. ECMWF Operasyonel Arşivi verilerinin HYDROTAM-3D ile çözümü



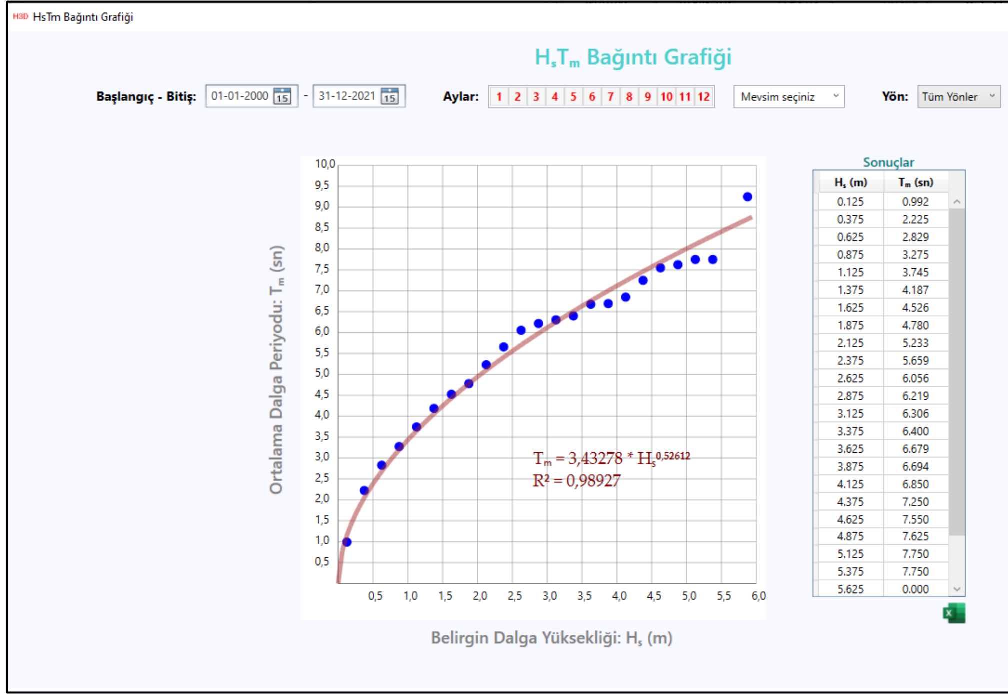
Şekil 6.13. ECMWF Operasyonel Arşivden HYDROTAM-3D ile elde edilen en büyük değer dalga istatistiği (Gumble)

ECMWF Operasyonel Arşiv ile elde edilen tasarım dalga yüksekliğinin hem Rize Pazar Meteoroloji İstasyonundan büyük olması hem de (Uğurlu, 2017) ile uyumlu olması nedeniyle MCS'de kullanılmıştır. ECMWF Operasyonel Arşiv (41.2° N - 40.9° E)'den HYDROTAM-3D ile elde edilen aylık ortalama ve uç değer dalga yükseklikleri Şekil 6.14'te, H_s-T_m bağlantı grafiği Şekil 6.15'te ve dalga gülü Şekil 6.16'da verilmektedir.

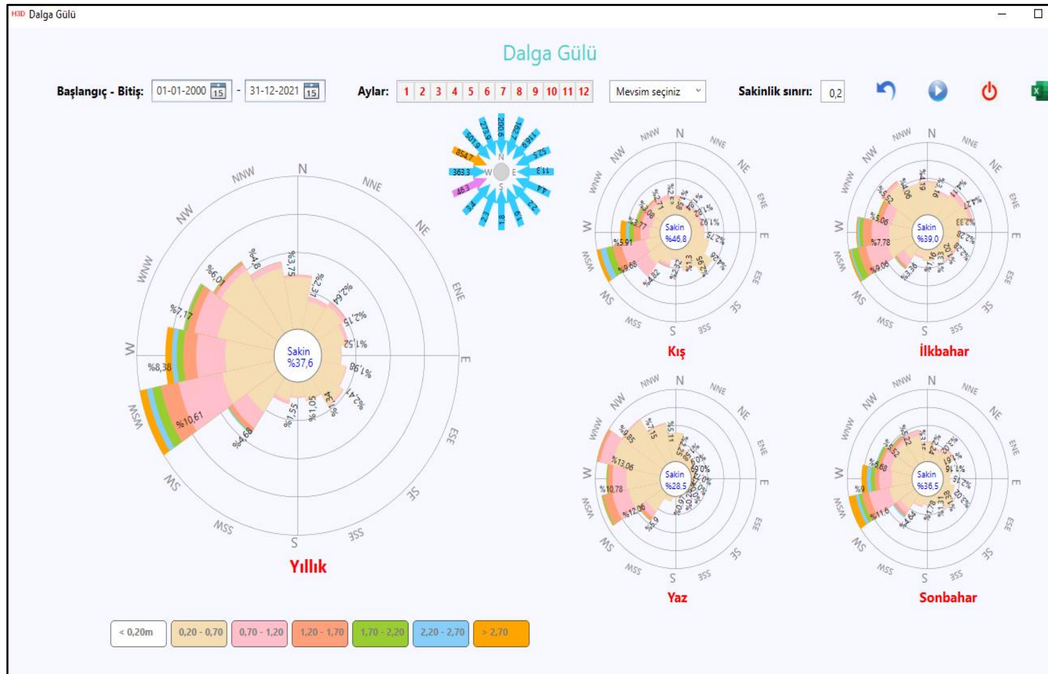
Tasarım dalgası ve deniz seviyesi değişimi dahil tüm veriler, FLOW-3D programına giriş verisi olarak yüklenerek YSS'ye göre modellemeler yapılmıştır. Su seviyesi değişiminin modele yüklenmesiyle, yapının ekonomik ömrü olarak öngörülen 100 yıl içerisinde iklim değişikliği kaynaklı su seviyesi değişimi sayısal modelleme de göz önüne alınmış olmaktadır.



Şekil 6.14. ECMWF Operasyonel Arşivden HYDROTAM-3D ile elde edilen aylık ortalama ve uç değer dalga yükseklikleri



Şekil 6.15. ECMWF Operasyonel Arşivden HYDROTAM-3D ile elde edilen H_s-T_m bağlantı grafiği

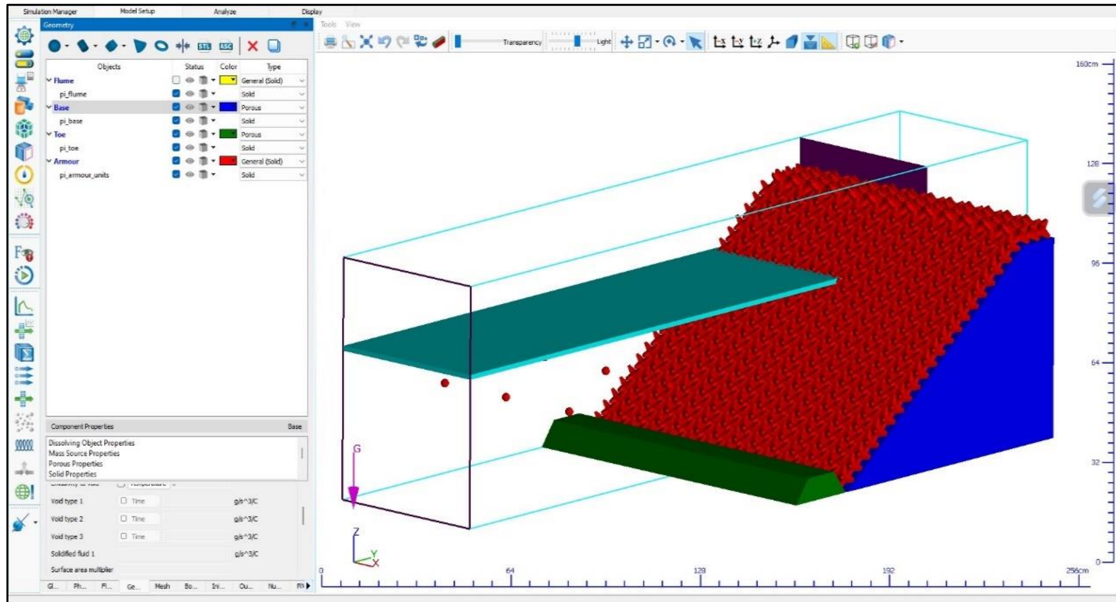


Şekil 6.16. ECMWF Operasyonel Arşivden HYDROTAM-3D ile elde edilen dalga gülü

(Uğurlu, 2017) tarafından gerçekleştirilen hidrolik model deneylerinde kullanılan kanal, aynı ölçülerde (1,20 m) FLOW-3D içinde oluşturulmuştur. FLOW-3D yazılımına tanıtılan model verileri, Şekil 6.17 - Şekil 6.22 arasında verilmiştir. Şekil 6.17'de, FLOW-3D yazılımı

ile oluşturulan dalga kanalı görülmektedir. Modelleme süresini kısaltmak amacıyla kesit, yarı genişlikte çözülmüştür. Analiz için kullanılan birimler g/cm/s olarak Şekil 6.18'de verilmiştir. Modelleme sırasında kullanılan sıvının sıcaklık ve yoğunluk değerleri (20 °C ve 1,03 t/m³), Şekil 6.19'da sunulmuştur. Autocad 3D ile çizilen ve [.stl] olarak kaydedildikten sonra, FLOW-3D'de giriş verisi olarak kullanılan yapı bölümlerine ait geometriler Şekil 6.20'de sunulmuştur. FEA çözüm için FLOW-3D bünyesinde oluşturulan sayısal ağ (mesh) yapısı Şekil 6.21'de, çözüm noktası sayısı ise Şekil 6.22'de açıklanmıştır. Modelleme süresinin kısaltılması ve aynı zamanda model hassasiyetinin en üst düzeyde sağlanması amacıyla yapılan optimizasyon çalışmalarında, yaklaşık 500.000 düğüm sayısı denemeler sonucu elde edilmiştir. Çözüm ağı boyutları x,y ve z yönünde 1,40 cm olarak sisteme tanımlanmıştır (Şekil 6.22).

Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te modelde tanımlanan sınır koşulları ve bu sınır koşullarında tanıtılan parametreler görülmektedir. X yönünde sınır koşulları, + ve – yöne göre sırasıyla simetri ekseni ve kanal duvarıdır. Y yönünde sınır koşulları, + ve – yöne göre sırasıyla oluşturulan dalganın parametreleri, yani dalga yüksekliği ile basıncıdır. Z yönünde sınır koşulları, + ve – yöne göre sırasıyla etkiyen dalga basıncı ve kanal tabanıdır.



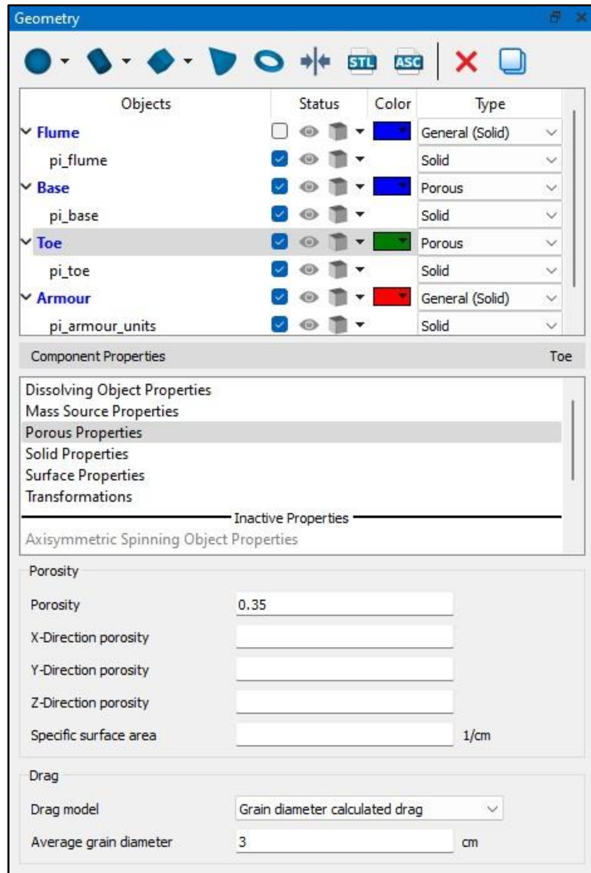
Şekil 6.17. FLOW-3D yazılımı içerisinde kurulan dalga kanalı

Units
Units system Mass Length Time Charge Temperature
Custom g cm s n/a Celsius
Pressure type Gauge
Reference pressure (default = 1 atm) 1.013e+06 g/cm/s^2
Reference temperature 0 C
Start and finish conditions
Restart time s Restart Options
Finish time 60 s Finish Options

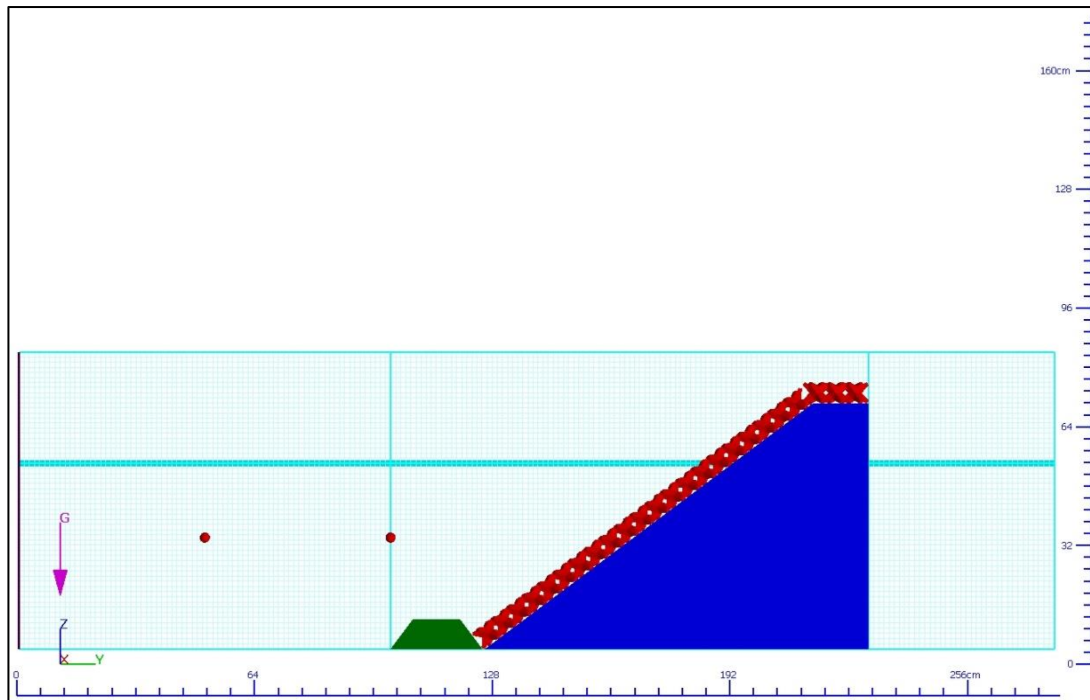
Şekil 6.18. FLOW-3D yazılımı içerisinde kullanılan birimler

Properties for Fluid 1
Material name Salt Water at 20 C
Reference temperature 0 C
Density Viscosity Thermal
Density Tabular 1.03 g/cm^3
Volumetric thermal expansion 0 1/C
Compressibility 4.56123e-11 cm-s^2/g

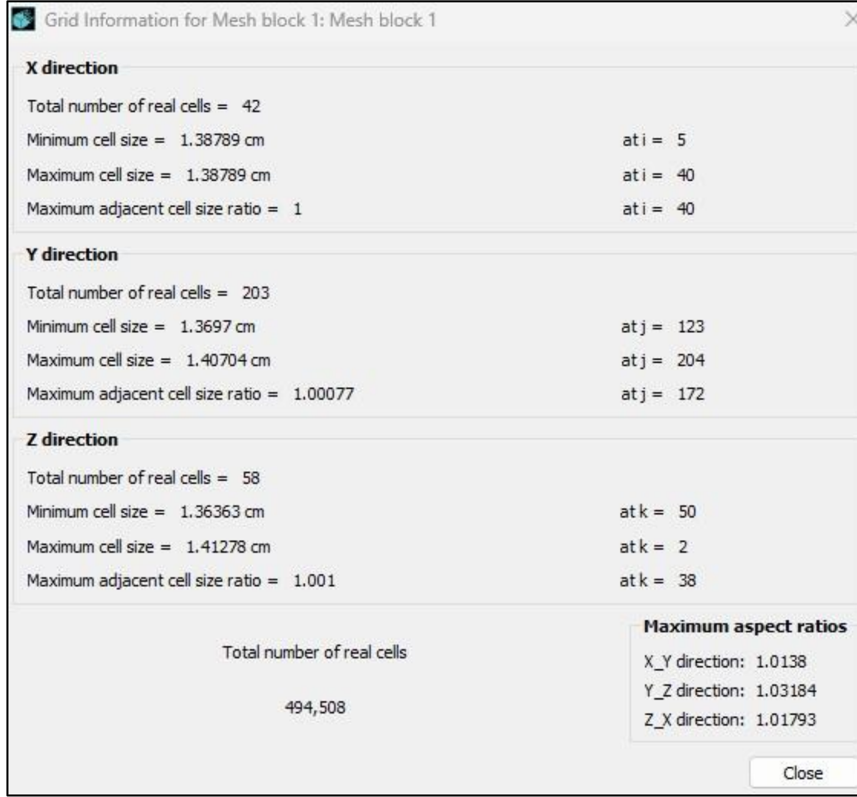
Şekil 6.19. FLOW-3D yazılımı içerisinde tanımlanan sıvının özellikleri



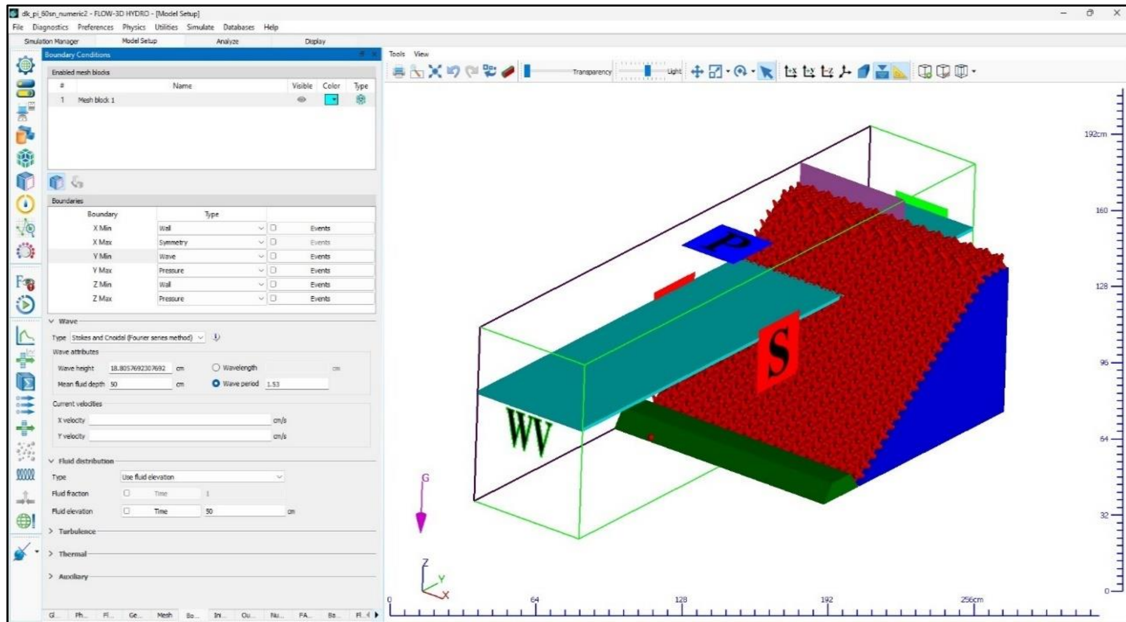
Şekil 6.20. FLOW-3D içerisinde oluşturulan geometri



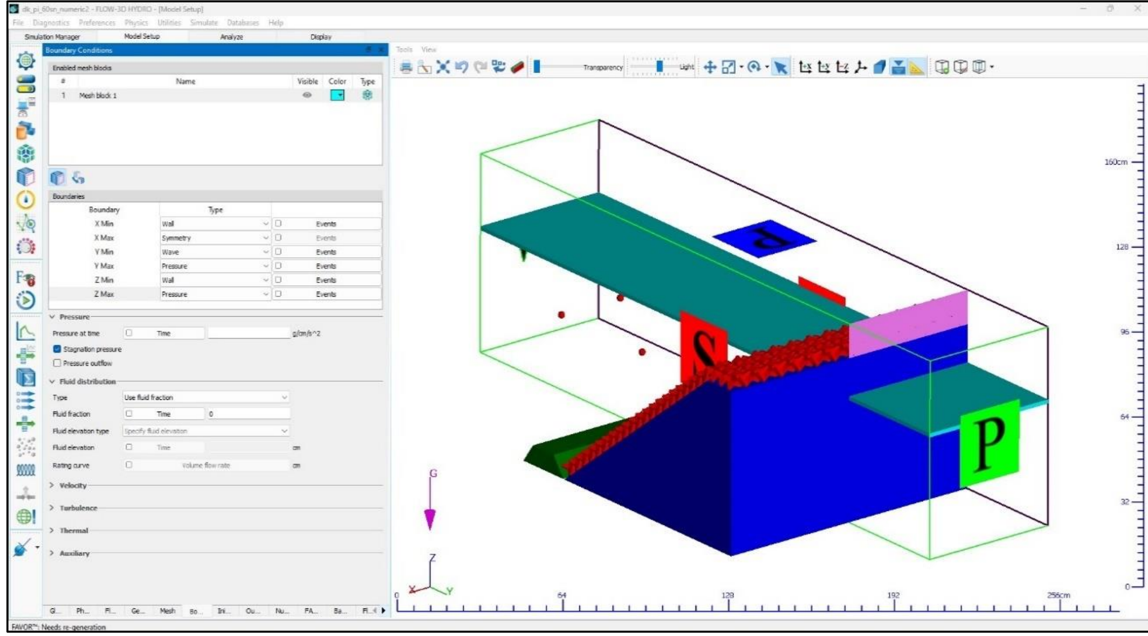
Şekil 6.21. FLOW-3D içerisinde oluşturulan mesh yapısı



Şekil 6.22. FLOW-3D içerisinde oluşturulan mesh sayısı

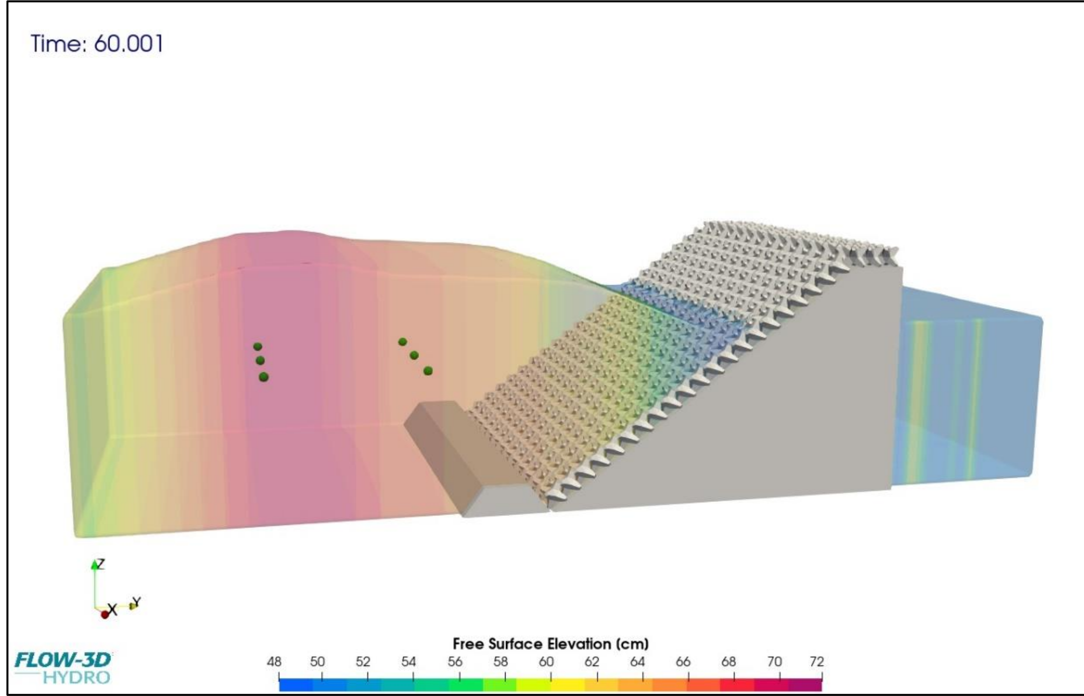


Şekil 6.23. FLOW-3D modelinde yer alan sınırlar

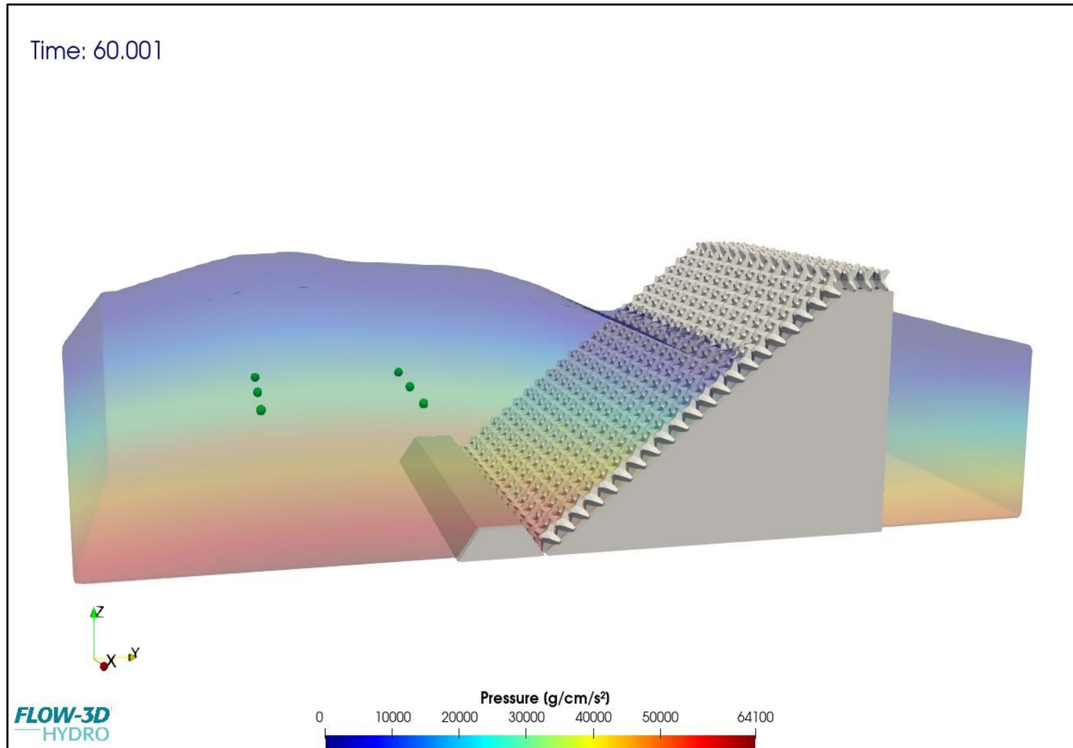


Şekil 6.24. FLOW-3D modelinde yer alan sınırlar

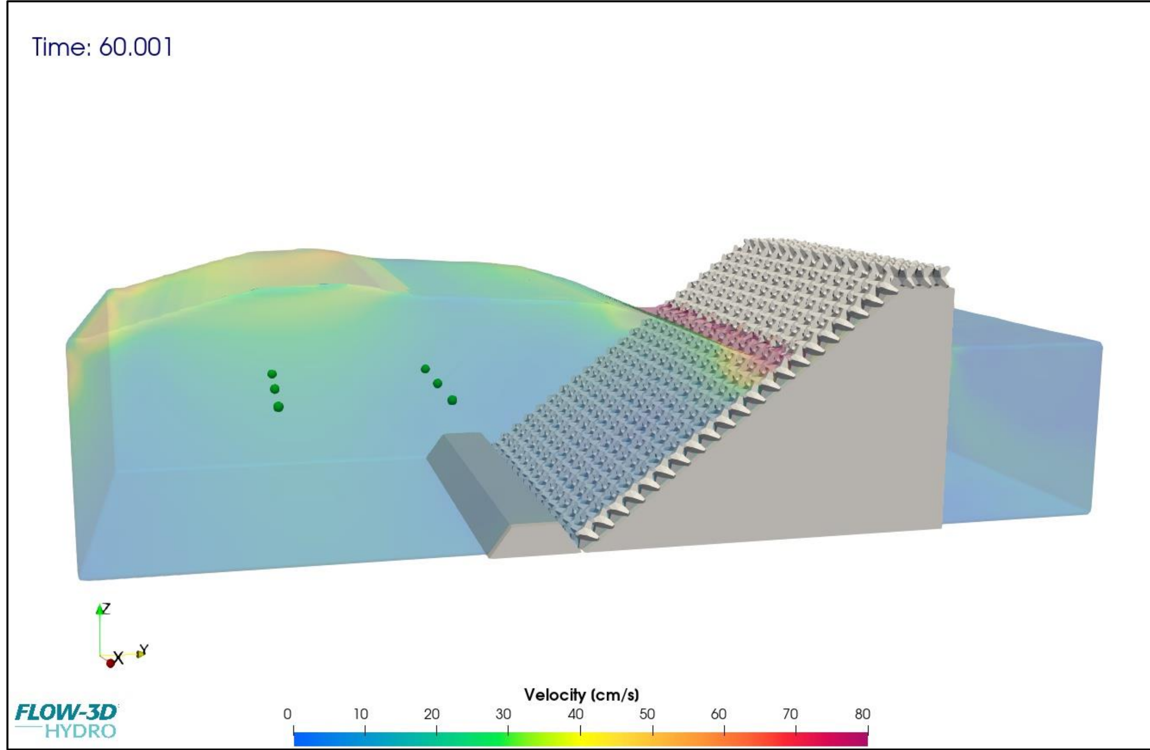
Piblok+ tek sıra koruma tabakasına ait HAD analizlerinin FLOW-3D yazılımı ile yapılarak tamamlanması sonrasında elde edilen sonuçlar, aşma ve dayanım yönünden değerlendirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen serbest yüzey değişimleri, basınç değerleri, partikül hızları ve derinliğe bağlı hızlar sırasıyla Şekil 6.25, Şekil 6.26, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de verilmiştir. Model çıktıları sonucunda elde edilen aşma ve basınç (dayanım) değerleri görselleştirilerek Şekil 6.29 ve Şekil 6.30’da sunulmaktadır. (Uğurlu, 2017) tarafından yapılan hidrolik model deneyleri ile Piblok+ koruma tabakasının karşılaştırılması için, fiziksel modelde yer alan çalışmalardan birisi HAD ile çözülmüş ve karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Karşılaştırmada uygunluk olması için fiziksel modellerde 12 m^3 olarak kullanılan Accropode II modelleri gibi FLOW-3D analizlerinde de Piblok+ 12 m^3 olarak kullanılmıştır. Ölçek olarak her iki modelde de 1/52 kullanılmıştır. Şekil 6.30’da görüldüğü üzere Piblok+, tanımlı dalga koşulları altında stabil olarak kalmıştır. Bu durum, sıfır hasar kabulü ile geliştirilen tek kat koruma tabakalarının en önemli özelliğidir.



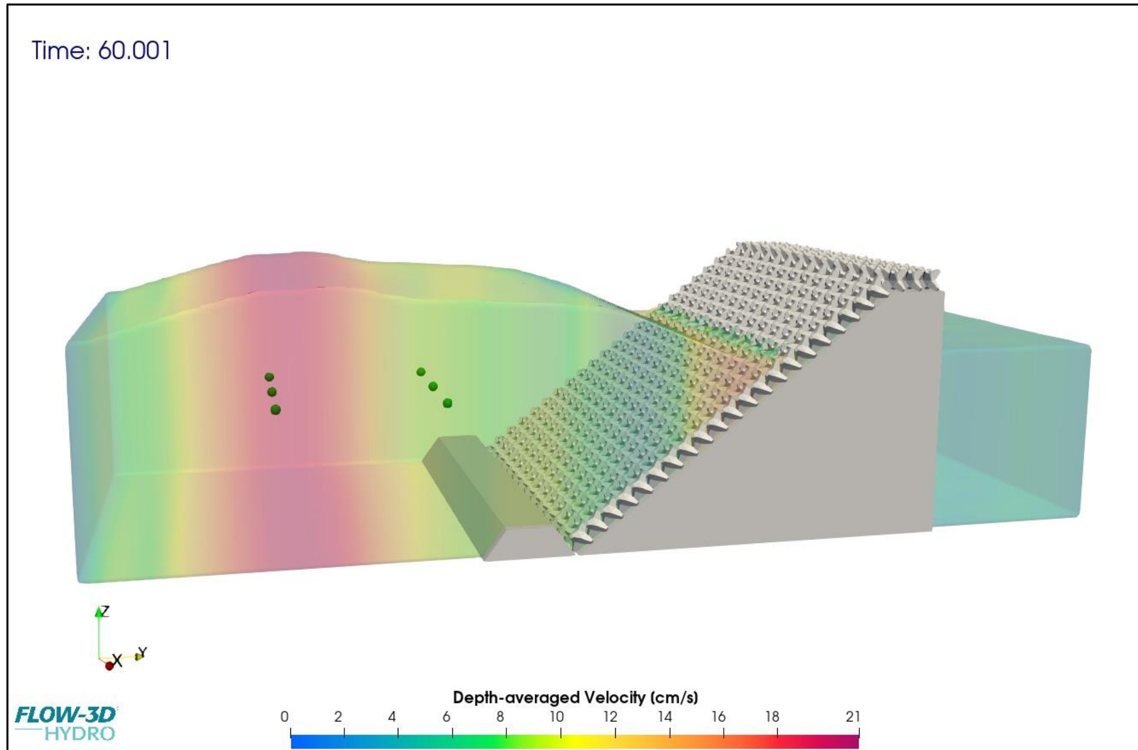
Şekil 6.25. Model bünyesinde elde edilen serbest yüzey değişimi (cm).



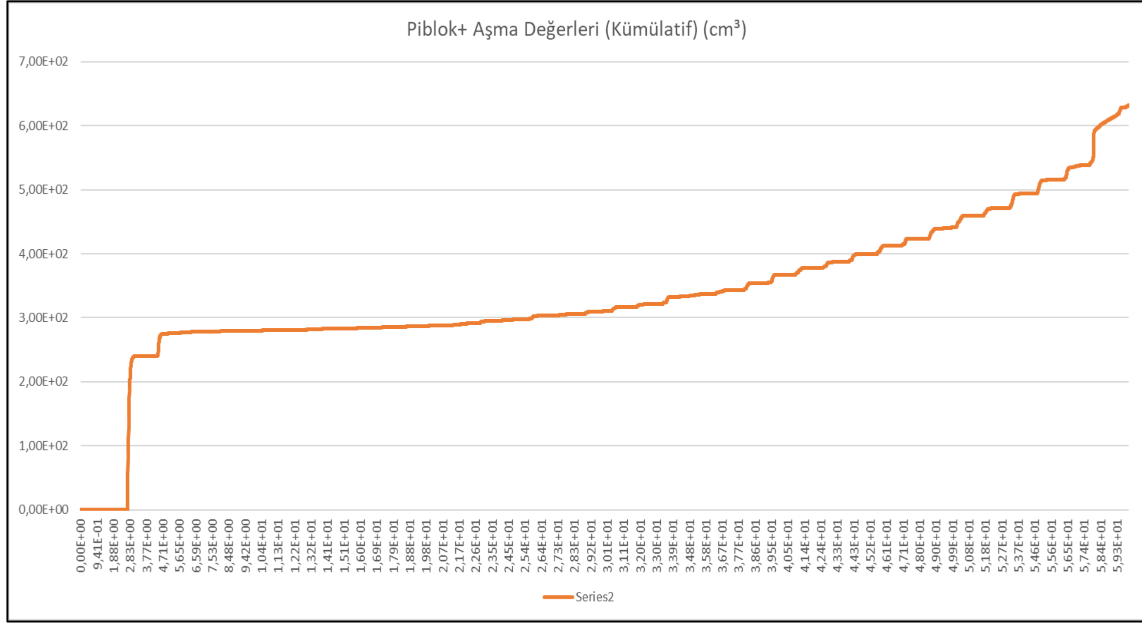
Şekil 6.26. Model bünyesinde elde edilen basınç değerleri (g/cm/s^2).



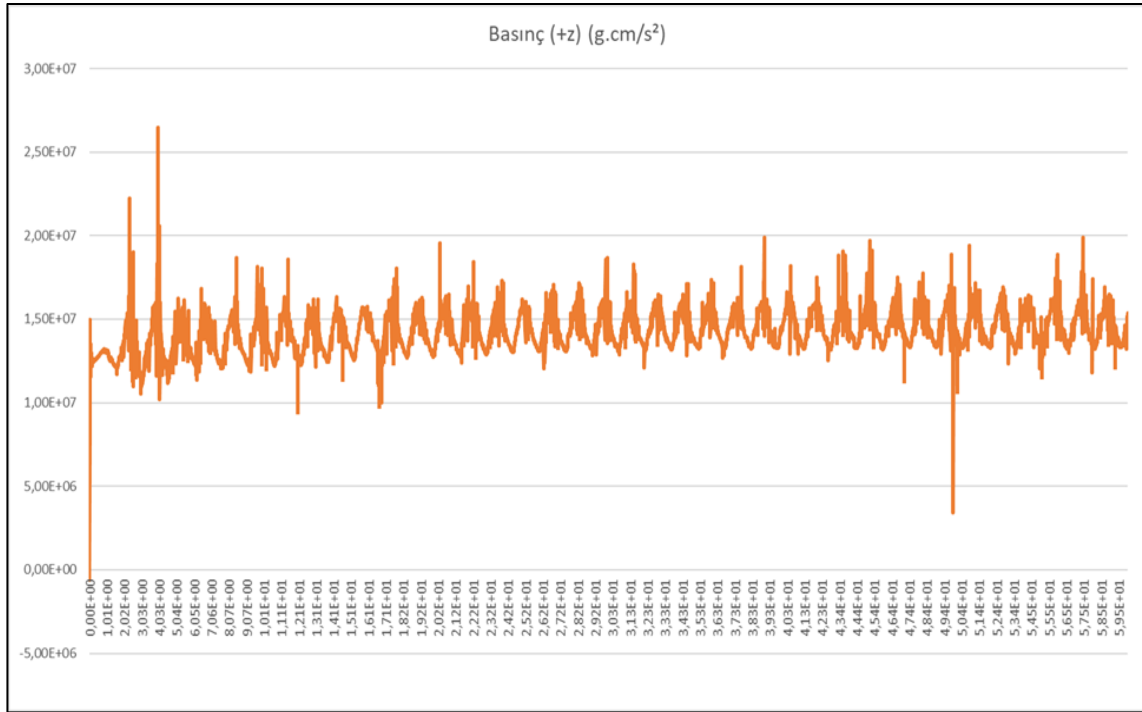
Şekil 6.27. Model bünyesinde elde edilen su partikül hızları (cm/s).



Şekil 6.28. Model bünyesinde elde edilen derinlik boyunca ortalama hızlar (cm/s).



Şekil 6.29. FLOW-3D analiz sonucu elde edilen Piblok+ kümülatif aşma değerleri (cm^3).



Şekil 6.30. FLOW-3D analiz sonucu elde edilen Piblok+ basınç (dayanım) değerleri (g.cm/s^2)

Şekil 6.29’da, toplam 1 dakika süren analiz boyunca 59 cm’lik kesitten aşan su miktarı, 630 cm³ olarak verilmektedir. 1/52 ölçekle model prototip geçişi yapıldığında gerçekte elde edilmesi beklenen aşma miktarı 6,673 l/s/m olmaktadır.

Şekil 6.30’da verilen en yüksek basınç değeri $2,60*10^7$ g.cm/s² olarak görülmektedir. CGS sisteminde (dyne), öncelikle 10^{-5} ile çarpılarak Newton’a dönüştürülmüştür. Sonrasında 1 Newton’un 101 g olmasına bağlı olarak 26260 g basınç değerinin tüm koruma tabakası üzerine etkidiği belirlenmiştir. Koruma tabakasının toplam hacmi 15485,6 cm³ olarak elde edilmiştir. Bu değer 2,4 t/m³ olan beton özgül ağırlığı ile çarpılarak 37165,44 g ağırlığa ulaşılmıştır. Analiz sonucu elde edilen değerlere göre koruma tabakasının basınç altında dengede olduğu görülmüştür.

6.1. Piblok+ Olasılıksal Analizi

Önceki bölümlerde Accropode II koruma tabakası için (CLI, 2024) limit durum fonksiyonuna bağlı olarak MCS ile olasılıksal tasarım yapılmıştır. MCS için Hudson limit durum fonksiyonu kullanılmış ve (Uğurlu, 2017) ile benzer sonuçlar vermiştir.

Buna bağlı olarak Piblok+ için de Hudson limit durum fonksiyonu ile MCS gerçekleştirilmiştir. Piblok+ için, Accropode II’de olduğu gibi, 12 m³ hacminde üniteler kullanılmıştır. 12 m³ için Hudson limit durum fonksiyonu MCS ile prototip koşullarında benzeştirilmiştir. Tasarım parametrelerine tanımlanan olasılık dağılımları Çizelge *6.4*’te verilmektedir. Şekil 6.31’de görüleceği üzere ekonomik ömrü boyunca (100 yıl) yapıda Hudson limit durum fonksiyonu ile %(0-5) hasarsızlık düzeyinin aşılma olasılığı %96,76’dir.

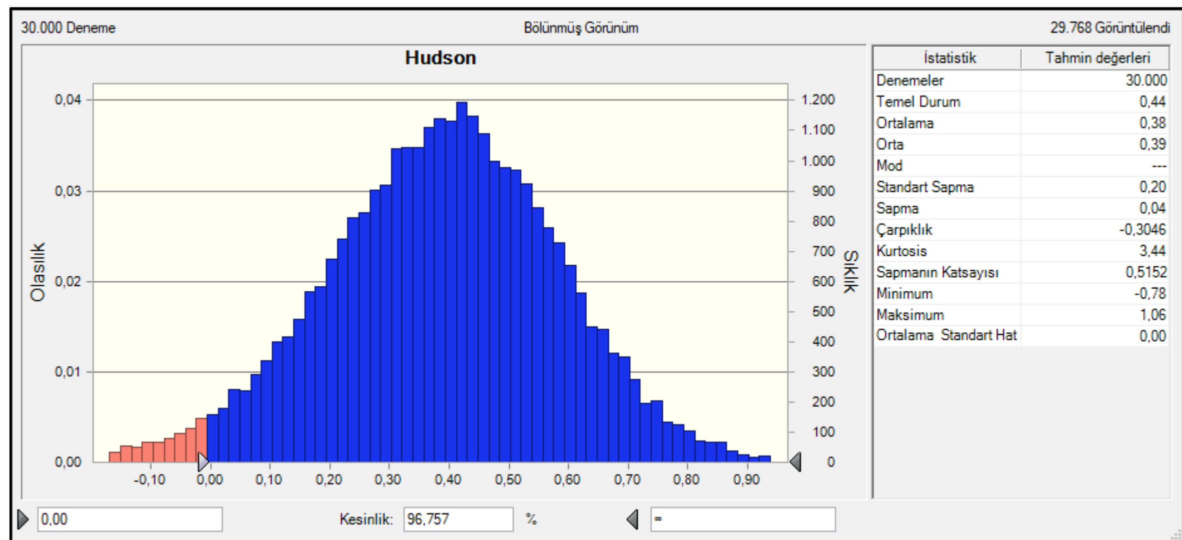
Hassasiyet analizi yoluyla belirlenen en önemli tasarım parametreleri, Şekil 6.32’de sunulmuştur. Şekil 6.32’de görüldüğü üzere tasarım dakga yüksekliği (H_s), yapısal stabiliteyi MCS (Monte Carlo Simülasyonu) yoluyla belirlemede –% 72,70 ile en büyük etkiye sahiptir. Göreceli özgül ağırlık (Δ) % 19,20 ile ikincil büyük etkiye sahip olmaktadır. Koruma tabaksı nominal çapı (Dn50) ve yapı eğimi (cot α) sırasıyla % 6 ve % 2 seviyesinde yapı stabilitesinde etki sahibidir. Hassasiyet analizi, Monte Carlo simülasyonunda (MCS) rastgele tasarım değişkenlerinin katkısını analiz etmek için uygulanmıştır.

Şekil 6.33’teki dağılım diyagramları, kıyı yapısının stabilitesinin tasarım değişkenleri ile pozitif veya negatif bir korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. Tasarım dalga yüksekliği yapı stabilitesi üzerinde gövde için -0,8307 büyüklüğünde etkiye sahiptir. Göreceli özgül ağırlık yapı stabilitesine 0,4271 mertebesinde etki etmektedir. Stabilite

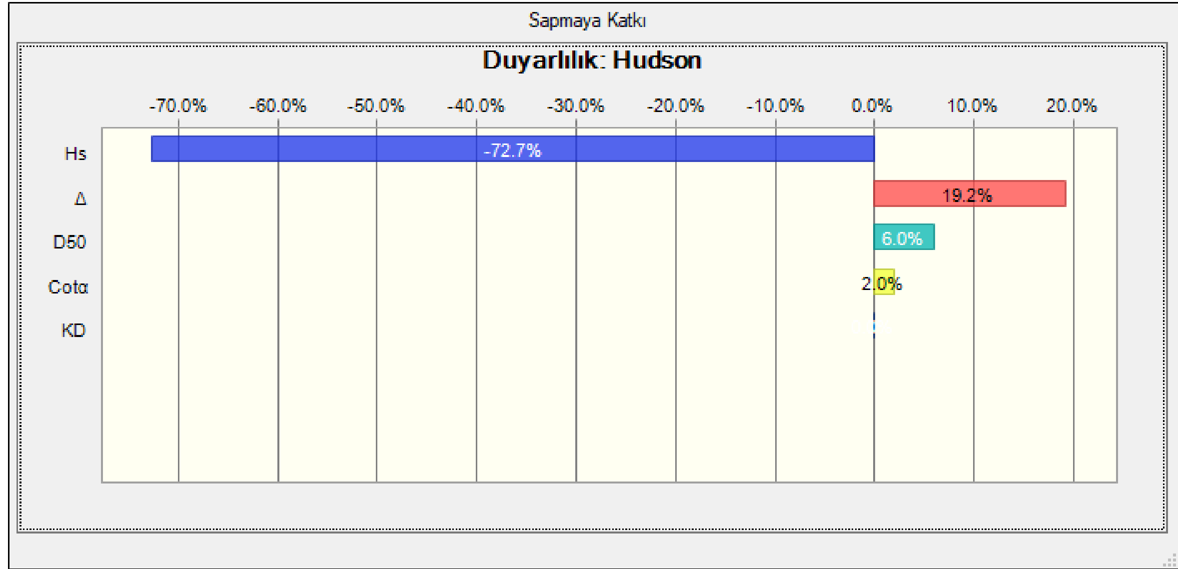
katsayısı 0,0174, koruma tabakası nominal çapı 0,2395, yapı eğimi 0,1389 ağırlığa sahiptir. Göreceli özgül ağırlık (yapı ağırlığı - kaldırma kuvveti) ve tasarım dalga yüksekliği, yapısal stabiliteyi belirlemede en büyük etkiye sahiptir.

Çizelge 6.4. MCS tarafından modellenen tasarım parametrelerinin ve olasılık dağılımlarının değişimleri

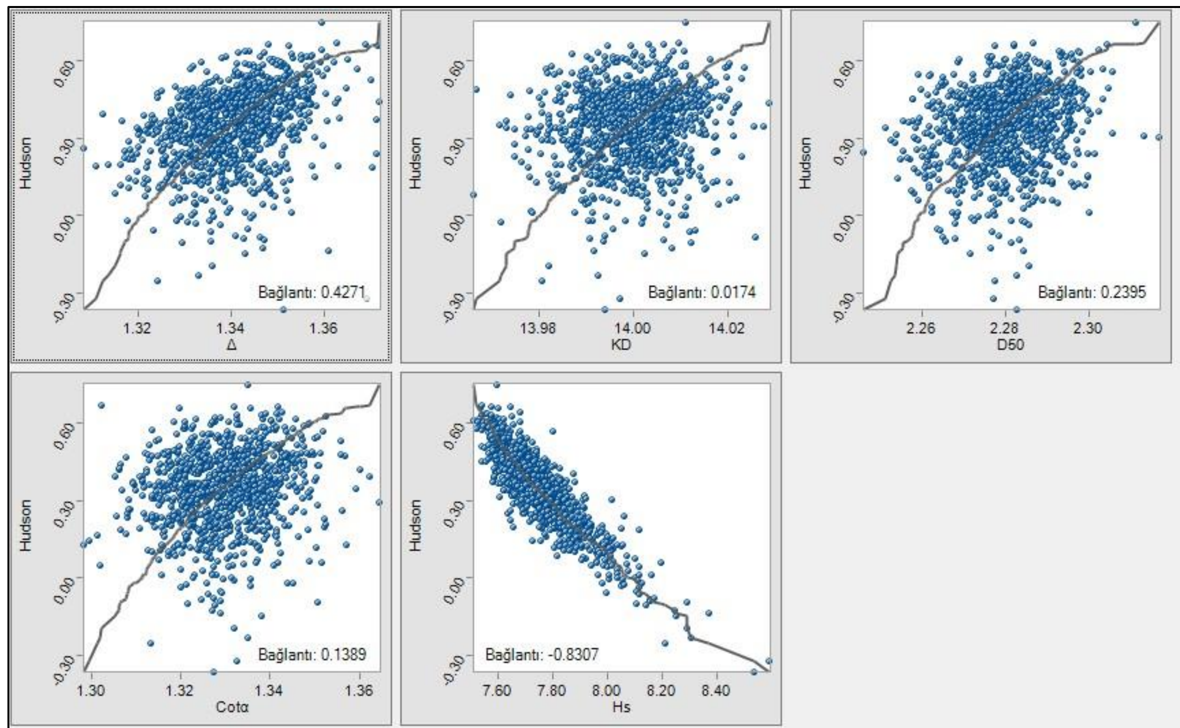
Değişken	Tanım	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma / Ölçek	Dağılım Türü	Dağılım
W_{50} (ton)	Ortalama Tabaka Ağırlığı		28,8		0,05	Modellendi	
H_d (m)	Tasarım Dalga Yüksekliği	7,50	7,70	8,2	0,10	Gumbel	
Dn50 (m)	Koruma Tabakası Nominal Çapı	2,25	2,28	2,31	0,01	Log-normal	
K_D	Stabilite Katsayısı	13,97	14	14,03	0.01	Log-normal	
Cotα	Yapı Eğimi	1,47	1,50	1,53	0,01	Log-normal	
Δ	Göreceli özgül ağırlık	1,31	1,34	1,37	0,01	Log-normal	



Şekil 6.31. Yapının ömrü boyunca (100 yıl) gövde kesiti için Hudson limit durum fonksiyonu %(0-5) hasarsızlık düzeyinin aşılma olasılığı.



Şekil 6.32. MCS tarafından yapılan Accropode limit durum fonksiyonu duyarlılık analizi



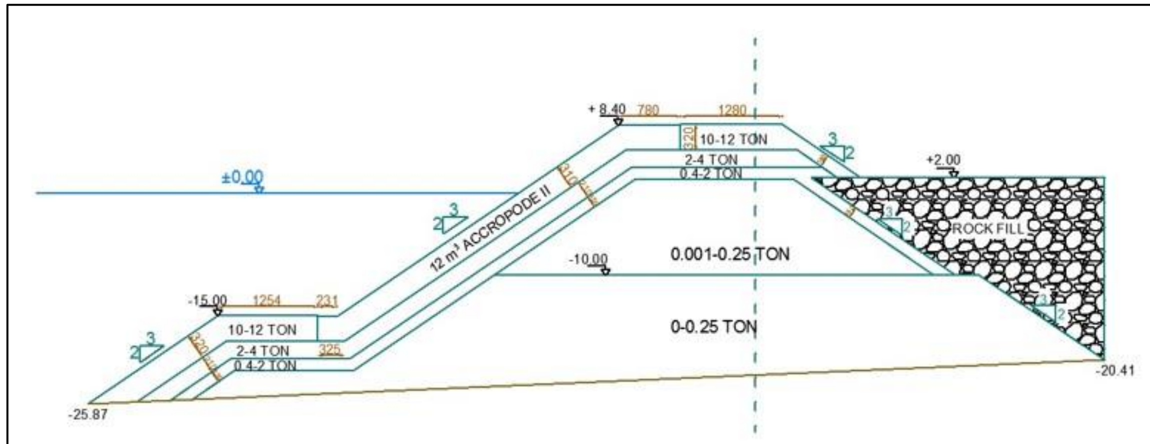
Şekil 6.33. Tasarım parametrelerinin saçılım grafiği (gövde kesiti)

6.2. Piblok+'ın Accropode II ile karşılaştırılması

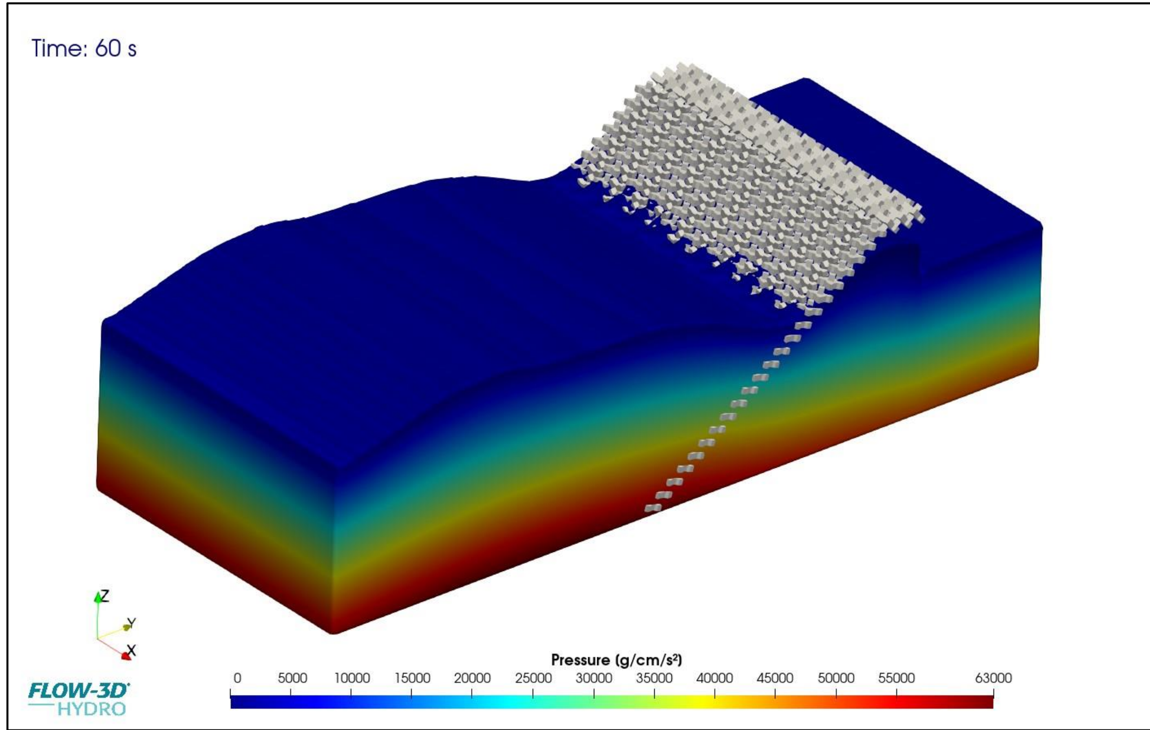
Accropode II ile Piblok+ özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla, HAD (Piblok+) sayısal modelinin hidrolik model deneyleri ile (Accropode II) sonuçlarının kalibre edilmesi gerekmiştir. (Uğurlu, 2017) tarafından yapılan çalışmada Accropode II hidrolik model

deneyleri, HAD tabanlı FLOW-3D yazılımı ile sayısal ortamda yinelenmiştir. (Uğurlu, 2017) tarafından yapılan çalışmada hidrolik modeli yapılan alternatiflerden, sonuç değerleri uygun olan ve HAD analizinde kullanılan Accropode II koruma tabakalı kesit, Şekil 6.34'te verilmiştir. Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da sırasıyla basınç ve dalga tırmanma görsellerini içeren model görsel çıktıları bulunmaktadır. Şekil 6.37'de görüldüğü üzere en büyük basınç değeri 1,70*10^7 g.cm/s²dir. Bu değeri grama çevirdiğimiz zaman elde edilen değer sayısal model ölçeğinde 17170 g'dır ve 15500 cm³ hacimli ve 37200 g ağırlıklı sistemin sayısal modelde dengede (stabil) olduğunu göstermektedir. Bu durum hidrolik model deneylerinde doğrulanmış ve aynı zamanda HAD analizinin güvenirliğini göstermiştir.

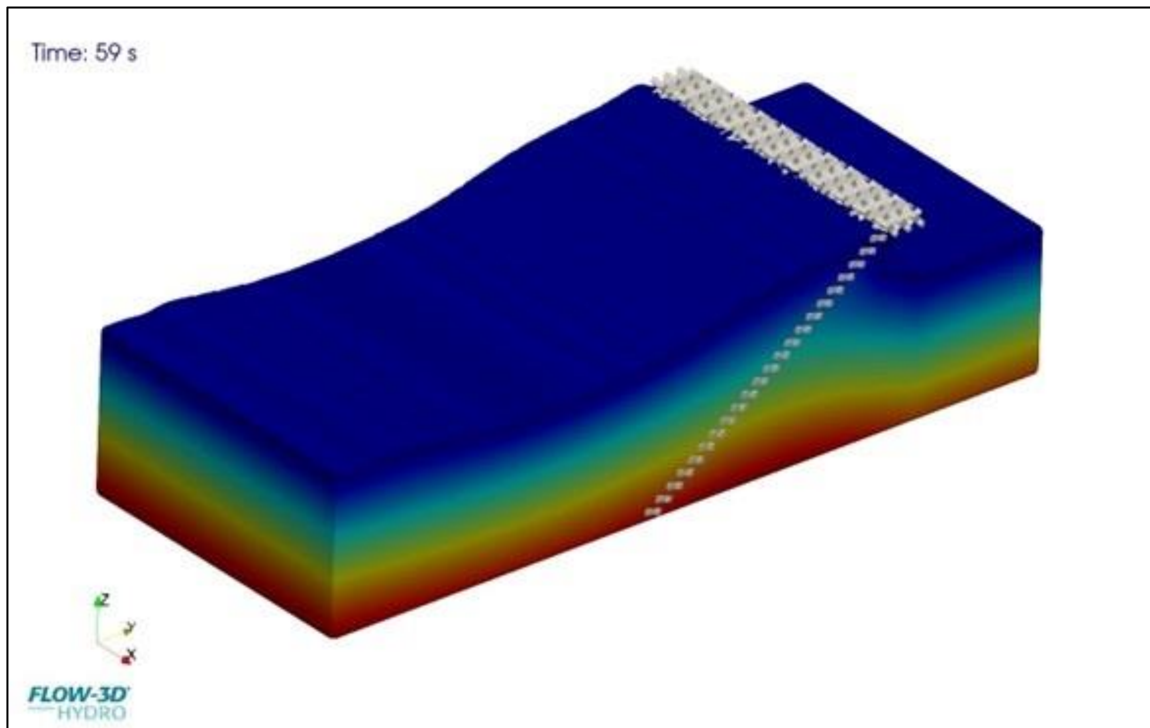
Piblok+ ile Accropode II'nin kalibrasyonu için aşma değerleri de karşılaştırılmıştır. Accropode II'nin kümülatif aşma değeri, 1 dakikalık sayısal analiz süresince, 60 cm kanal genişliğinden 1/52 ölçek ile toplam 170 cm³ olarak elde edilmiştir (Şekil 6.38). Bu değer, prototipte 1,801 l/s/m'ye karşılık gelmektedir. (Uğurlu, 2017)'nun çalışmasında hidrolik model deneylerinde bulunan değer 4,91 l/s/m olarak elde edilmiştir. Hidrolik model deneyleri, bire bir prototip koşullarını Froude ölçeğinde modellediğinden bulunan aşma miktarlarının uzun süreli fırtına koşullarında daha gerçekçi olduğu görülmektedir.



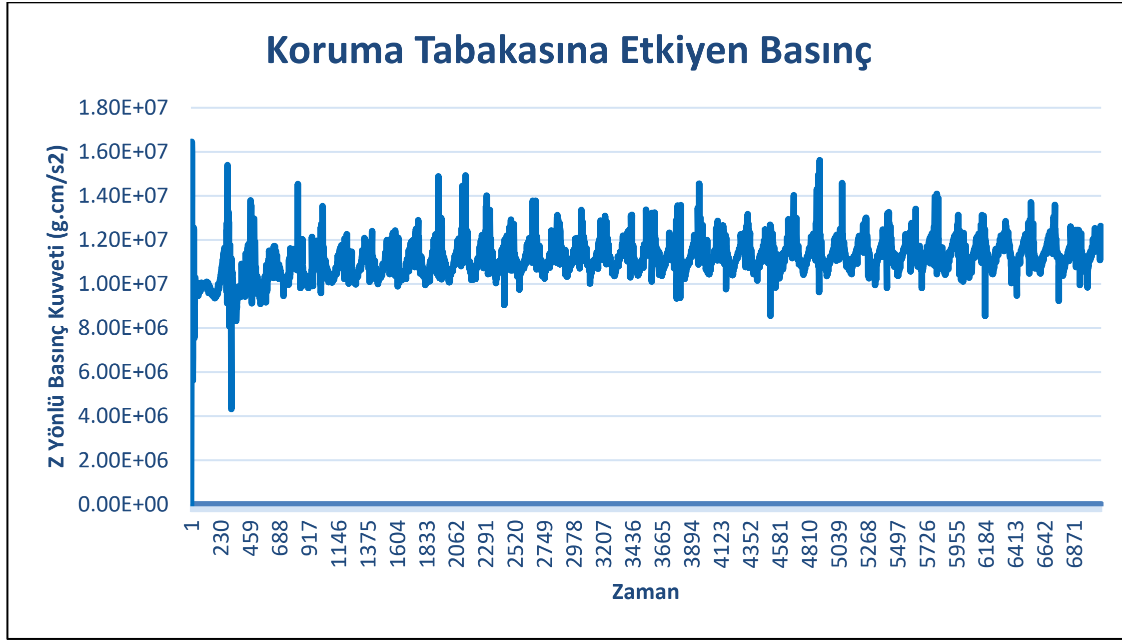
Şekil 6.34. HAD analizi yapılan Accropode II kesiti



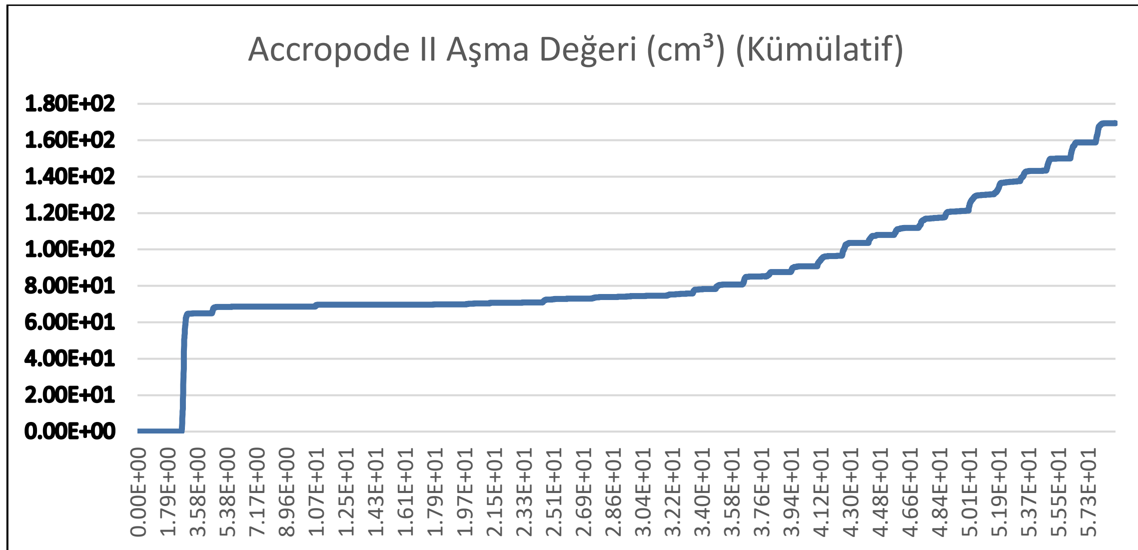
Şekil 6.35. Model bünyesinde elde edilen basınç değerleri (g.cm/s²).



Şekil 6.36. Model bünyesinde elde edilen dalga tırmanma görseli



Şekil 6.37. FLOW-3D analiz sonucu elde edilen Accropode II basınç (dayanım) değerleri (g.cm/s²).



Şekil 6.38. FLOW-3D analiz sonucu elde edilen Accropode II aşma (kümülatif) değeri (cm^3)

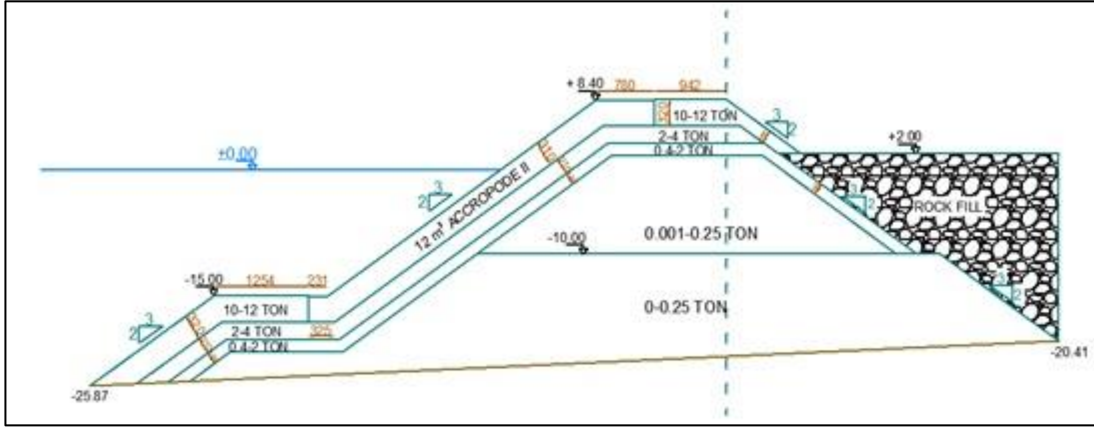
HAD benzeşimleri sonucu Piblok+ aşma değerleri 6,67-9.78 l/s/m aralığında elde edilmektedir. Piblok+ kret yapısı, Şekil 6.3'te görüldüğü üzere üç sıra Piblok+ ünitesinden oluşmaktadır ve (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016) tarafından verilen taş dolgu dalgakıranlar, H_{m0}>5 m için dalga aşması değeri olan Q < 10 l/s/m değerini sağlamaktadır.

6.3. Piblok+ ile Accropode II model sonuçlarının karşılaştırılması

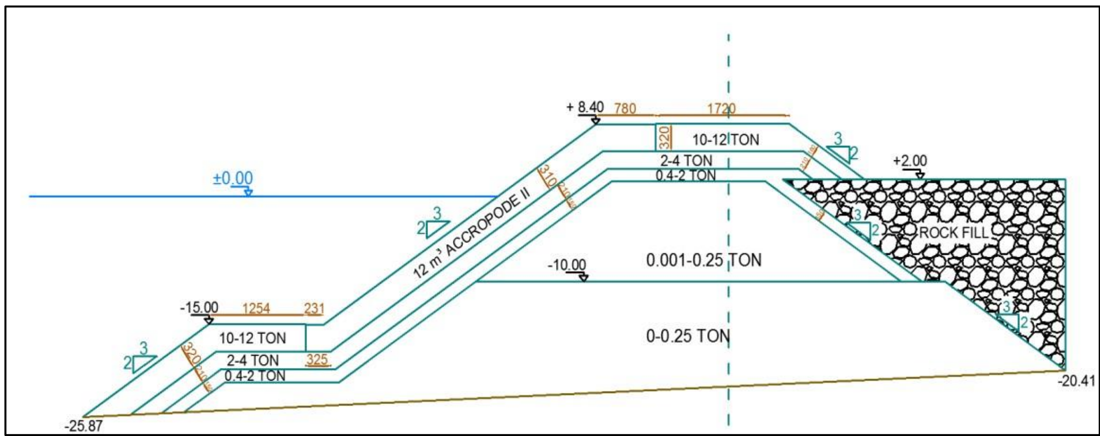
(Uğurlu, 2017)'nun Rize-Artvin Havalimanı koruma tabakası hidrolik model deneylerinde elde edilen veriler Çizelge *6.5*'te sunulmuştur. Çizelge *6.5*'e Piblok+ sayısal benzeşim değerleri de ilave edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge *6.5*'te modellemelere ilave olarak (van der Meer vd., 2018) ile de aşma debisi hesaplanmıştır. Hem fiziksel hem de HAD ile yapılan modellemelerde 3 tekrar yapılarak ortalama aşma değeri alınmış ve Çizelge *6.5*'te bu şekilde yer verilmiştir. Çizelge *6.5*'te Accropode II ve Piblok+ ünitelerinin aşma değerleri ve hasar oranlarını karşılaştırılmaktadır.

EurOtop (van der Meer vd., 2018), kıyı yapıları üzerinden dalga aşması konusunda en yaygın kullanılan el kitabıdır. Büyük ölçüde Avrupa'daki araştırmalarına dayanan ancak dünya çapında uygulamalar için hazırlanmış bir dalga aşması el kitabıdır.

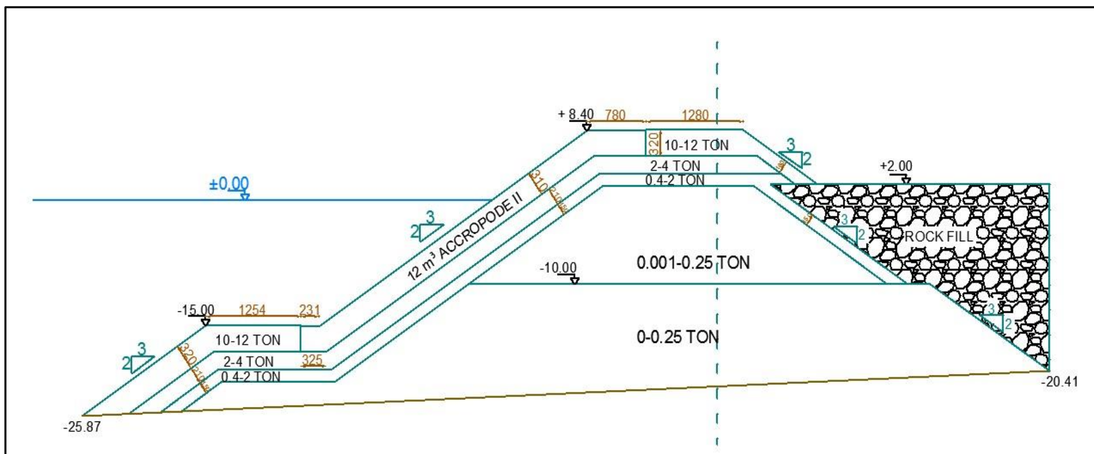
EurOtop (van der Meer vd., 2018) el kitabının Aralık 2018 tarihli ikinci baskısında yapı eğimi için kısıt bulunmaktadır. Yapı eğiminin ½ ile 3/4 aralığında olması gerekliliği bulunmaktadır. Tezde incelenen tüm yapı alternatifleri bu şartı karşılamaktadır (Şekil 6.39 - Şekil 6.42). Bu el kitabı, dalga aşması tahminleri ve tasarımı için kapsamlı rehberlik sunmasına rağmen, uygulandığı yapının türü, malzemesi ve yerel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak sınırlandırılabilir. Örneğin, farklı kıyı koruma yapılarının geometrik ve yapısal özellikleri, dalga dinamiklerine ve aşma potansiyeline etkide bulunabilir. Ayrıca, EurOtop büyük ölçüde Avrupa'daki veri ve araştırmalara dayandığından, diğer coğrafi bölgelerdeki farklı iklimsel ve oşinografi koşullarda, örneğin Karadeniz'de kullanılırken hidrolik model deneyleri ve sayısal modellerle karşılaştırıldığında farklı sonuçların elde edilmesi beklenebilir. Yapısal kısıtlamaların yanı sıra, ulusal yönetmelikler ve mühendislik standartları da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, EurOtop kullanılırken her projenin özgün koşulları ve gereksinimleri göz önünde bulundurulmalıdır. Accropode II alternatiflerine ait çizimler Şekil 6.39 - Şekil 6.41 arasında sunulmaktadır. HAD analizi yapılan Piblok+ kesiti Şekil 6.42'de görülmektedir.



Şekil 6.39. Hidrolik model deneyleri yapılan Accropode II kesiti (Alternatif 1)



Şekil 6.40. Hidrolik model deneyleri yapılan Accropode II kesiti (Alternatif 2)



Şekil 6.41. Hidrolik model deneyleri yapılan Accropode II kesiti (Alternatif 3)

Şekil 6.42. HAD analizi yapılan Piblok+ kesiti

Çizelge 6.5. Accropode II ve Piblok+ ünitelerinin hasar ve aşma yönünden karşılaştırılması

KORUMA TABAKASI	KRET GENİŞLİĞİ (m)	AŞMA DEĞERİ (l/s/m)	AŞMA DEĞERİ (Eurotop) (l/s/m)	KORUMA TABAKASI HASAR ORANI
Accropode II Alt-1	17,22	10,71	6,04	0,00 %
Accropode II Alt-2	25,00	1,72	1,32	0,00 %
Accropode II Alt-3	20,60	4,91	3,12	0,00 %
Piblok+	8,00	8,23	36,38*	0,00 %

*Not: Piblok+ için henüz hidrolik model deneyleri yapılmadığından sayısal model Flow3D ile bulunan sonuç yer almaktadır.

<u>Hidrolik ve sayısal model aşma değerleri</u>

Çizelge *6.5*'te, üçüncü sütunda belirtilen aşma değerleri Accropode için hidrolik model deneylerinden bulunan sonuçlar olup, Piblok+ için henüz hidrolik model deneyleri yapılmadığından sayısal model Flow3D ile bulunan sonuç yer almaktadır.

- Accropode II üniteleri (Alt-1, Alt-2, Alt-3) farklı kret genişliklerinde aşma değerleri sunmaktadır. Aşma değerleri (l/s/m) açısından en düşük değer Accropode II Alt-2'de 1,72 l/s/m, en yüksek değer ise Accropode II Alt-1'de 10,71 l/s/m olarak görülmektedir. Bu değerler EurOtop tarafından önerilen aşma değerleriyle de uyumludur.
- Piblok+ ünitesi için ise aşma değeri 8,23 l/s/m olarak belirtilmiş ve bu değer EurOtop'un önerdiği 36,38 l/s/m ile karşılaştırıldığında, Piblok+ ünitesinin EurOtop yöntemine göre aşma performansının beklenilenden yüksek olduğunu göstermektedir.

EurOtop aşma değerleri

- EurOtop tarafından önerilen aşma değerleri (l/s/m) Accropode II için daha düşük ve kabul edilebilir sınırlardadır. Örneğin, Accropode II Alt-1 için önerilen değer 6,04 l/s/m, Alt-2 için 1,32 l/s/m ve Alt-3 için 3,12 l/s/m olarak verilmiştir. Bu değerler, hidrolik model deneylerinden bulunan aşma değerlerinden düşüktür. Yapısal stabilite açısından iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.
- Piblok+ ünitesi için EurOtop'un önerdiği aşma değeri 36,38 l/s/m olup, sayısal modelden elde edilen aşma değeri olan 8,23 l/s/m'nin çok üzerindedir.

Koruma tabakası hasar oranı

- Çizelgedeki tüm üniteler için koruma tabakası hasarsızlık oranı aşılmamaktadır. Hem Accropode II hem de Piblok+ ünitelerinin stabilite açısından iyi performans gösterdiğini ve yapıların ekonomik ömürleri içerisinde %5 seviyesini geçen bir hasar beklenmediğini göstermektedir.

Accropode II üniteleri iyi aşma performansı ve stabilite göstermektedir. Aşma değerleri EurOtop önerileriyle uyumlu olup, hasar oranları sıfırdır. Piblok+ ünitesi sayısal modelde düşük aşma değeri ve sıfır hasar oranı ile stabilite açısından iyi performans sergilese de EurOtop yöntemi ile karşılaştırıldığında aşma performansının, hidrolik model deneyleri ile doğrulanması gerektiğini göstermektedir. Bu değerlendirme, her iki ünite tipinin de stabilite açısından güvenilir olduğunu ancak aşma performanslarının farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, EurOtop (van der Meer vd., 2018) ile yapılan hesaplamalarda elde edilen aşma değerleri Accropode II için fiziksel model sonuçları ile daha yakın sonuçlar vermesine rağmen, Piblok+ için HAD ile yapılan modelleme sonuçlarından ayrışmaktadır. Bu durum, açık deniz yapıları tasarımında HAD modellemelerinin mutlaka fiziksel modelleme çalışmaları ile gerçek koşullarda gerçeklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dayanım sonuçlarında ise Piblok+, Accropode II ile aynı sıfır hasar kriterini sağlamıştır.

6.4. Piblok+ ve Accropode II'nin ekonomik yönden karşılaştırılması

Rize-Artvin Havalimanı koruma tabakası, tez kapsamında Accropode II ve Piblok+ olarak çözülmüştür. Her iki alternatifin de stabilite durumu bu tez kapsamında analiz edilmiş ve yapıların denge durumunda olduğu tespit edilmiştir. Emniyet yönünden sorunsuz olduğu belirlenen alternatifler için devamında ikinci etap olarak ekonomik karşılaştırma yapılmıştır. Taş dolgu dalgakıranlar ilk olarak kullanılan malzeme yönünden, daha sonra maliyet yönünden karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.6 - Çizelge 6.7). Accropode II ve Piblok+ için boşluk oranı %54,58 ve taş için %33 alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Taşın özgül ağırlığı 2,70 t/m³ alınmıştır. Rize-Artvin Havalimanı koruma yapılarının toplam maliyet karşılaştırılması Çizelge 6.8' de özetlenmiştir.

Çizelge 6.6. Accropode II, Piblok+ ünitelerinin kullanılan malzeme miktarı yönünden karşılaştırılması (m başına kullanılan malzeme miktarı)

Alternatif	Beton (m³)	Çekirdek Malzemesi (m³)	0.4-2 Ton (m³)	2- 4 Ton (m³)	10-12 Ton (m³)
Accropode II Alt-1	73,89	987,79	107,80	123,73	92,46
Accropode II Alt-2	73,89	987,79	111,45	137,73	109,21
Accropode II Alt-3	73,89	987,79	110,96	128,49	100,17
Piblok+	73,89	759,61	73,47	107,80	61,17

Çizelge 6.7. Accropode II, Piblok+ ünitelerinin kullanılan maliyet yönünden karşılaştırılması (m başına maliyet) (AYGM 2023 yılı birim fiyatları ve Merkez Bankası 23.02.2024 tarihli USD kuru = 31,0605)

Alternatif	Beton (USD) 74.026.0042	Çekirdek Malzemesi (USD)	0.4-2 Ton (USD)	2- 4 Ton (USD)	10-12 Ton (USD)	TOPLAM (USD)
Accropode II Alt-1	6.214,60	1.097,05	136,08	180,13	200,55	7.828,41
Accropode II Alt-2	6.214,60	1.097,05	140,68	200,51	236,88	7.889,72
Accropode II Alt-3	6.214,60	1.097,05	140,06	187,06	217,27	7.856,04
Piblok+	6.214,60	843,63	92,74	177,73	233,82	7.562,52

Çizelge 6.8. Rize-Artvin Havalimanı Koruma Yapılarının Maliyet Karşılaştırılması (USD)

Accropode II Alt-1	Accropode II Alt-2	Accropode II Alt-3	Piblok+
7.828,41	7.889,72	7.856,04	7.562,52

Sonuç olarak, Çizelge *6.7*'de görüldüğü üzere taş dolgu koruma tabakaları içinde en ekonomik alternatif, Piblok+ olarak öne çıkmaktadır. Tüm alternatiflerin karşılaştırıldığı Çizelge 6.8'de Accropode II alternatifleri yüksek maliyetlidir. Piblok+ muadili Accropode II'den daha uygun ekonomik şartlarda inşa edilirken aynı zamanda Accropode II'den daha düşük aşma değerleri sağlayabilmektedir. Kaynakların verimli kullanılması ilkesi doğrultusunda, çalışılan alternatifler içinde Piblok+ kullanılması ekonomi yönünden ön plana çıkmaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında derin deniz ve kıyı yapılarının tasarımı için hibrit bir risk tasarım modeli DEKYAP geliştirilmiştir. Bu yapıların tasarımında olasılıksal alt modelin ve risk analizinin kullanılmamış olmasının yol açtığı hasarlar Karadeniz'de örneklerle belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Bu nedenle tüm mevzuatlarda belirlenimci yöntemle birlikte olasılıksal yöntemin yer alması ve belirsizliklerin tezde geliştirilen tasarım risk modeli ile ön görülerek gelecek hasarların önüne geçilmesi, iklim değişikliği çağında son derece önemlidir. (Muttray, 2006) tarafından önerilen limit durum fonksiyonları olasılıksal alt modelle (MCS) benzeştirildiğinde, yapının işletme ömrü boyunca maruz kalacağı çevresel yükler ve etkiler altında sağlam kalabilme olasılığı belirlenmektedir. (CLI, 2024) yaklaşımında da Hudson limit durum fonksiyonu kullanılmaktadır. Olasılıksal modelde Hudson limit durum fonksiyonu MCS ile benzeştirilmiştir. Tasarım parametrelerine tanımlanan olasılık dağılımları kullanılmıştır. Yapının ekonomik ömrü boyunca tüm çevresel faktörler altında yıkılma olasılığı elde edilmektedir. Hassasiyet analizi yoluyla belirlenen en önemli tasarım parametreleri, elde edilmektedir. Göreceli özgül ağırlık (yapı ağırlığı - kaldırma kuvveti) ve dalga kuvveti, yapısal stabiliteyi belirlemede en büyük etkiye sahiptir.

İklim Değişikliği Alt Modeli, deniz seviyesi değişim değerlerini tahmin ederek maksimum deniz seviyesi yüksekliği ve ortalama deniz seviyesi yüksekliklerini tasarımda göz önüne almaktadır. CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) modellerinden olan CNRM-CM6-1 iklim değişikliği modeli, SSP5 8.5 senaryolarına göre 2041-2060 ve 2081-2100 dönemlerini tasarımda dikkate almaktadır. Ek olarak rüzgâr kabarması, gelgit etkisi ve fırtına kabarması etkileri, tasarımda hesaba katılmaktadır. Rüzgâr kabarması, gelgit etkisi ve dalga kabarması, kümülatif olarak MCS alt modelinde kullanılmakta ve deniz alanı, kıyı / deniz yapılarının tasarım su seviyesinin belirlenmesi için modellenmektedir.

Bu amaçla da HYDROTAM-3D modeli, bir kez daha, geliştirilen tasarım risk modeli ile interaktif hâle getirilmiştir. Buna göre iklim değişikliği ve olası afet tehlikeleri çerçevesinde senaryo analizleri yapılmıştır. İklim değişikliğinin sonuçlarına hazırlıklı olunması ve olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi için iklimde gözlenen değişikliklerin ve eğilimlerin gelecekte nasıl olacağının tahmin edilmesi ve bu değişikliklerin doğal ve yapay yapılara etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen olasılıksal tasarım modeli, Rize-Artvin Havalimanı dalgakıranına uygulanmıştır. Hudson limit durum fonksiyonu (yapısal stabilite analizi kontrolü), MCS alt modelinde iklim değişikliği ve deniz seviyesi artışı gözetilerek yinelenmiştir. Küresel ısınmaya bağlı yapı stabilitesinin değişimi için oldukça önemli olan model aynı zamanda belirsizliklerin hesaplanması ve iklim değişikliği için geliştirilecek tasarım standartları ve alınacak önlemler için de yol göstericidir.

Örnek uygulamada, Rize-Artvin Havalimanı dalgakıranı, kazıklı ve farklı tek tabaka koruma tabakaları ile (Accropode II, Piblok+) emniyet ve ekonomi analizleri gerçekleştirilerek kıyaslanmıştır.

Tez kapsamında ülkemizin ilk tek sıra koruma tabakasının geliştirilmesi sürecine odaklanılmıştır. Accropode II ile Piblok+ özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla HAD (Piblok+) ve fiziksel model (Accropode II) sonuçları kalibre edilmiştir. (Uğurlu, 2017) tarafından yapılan Accropode II fiziksel modelleri, bu tezde HAD tabanlı FLOW3D yazılımı ile karşılaştırılmıştır. Hidrolik model deneylerini doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir. Piblok+ ile Accropode II'nin kalibrasyonu için aşma değerleri kullanılmış ve karşılaştırılmıştır.

Accropode II'nin kümülatif aşma değeri HAD ile benzetilmiştir. Piblok+ ile teşkil edilen dalgakıranın kret kısmı, üç sıra Piblok+ ünitesinden oluşmaktadır ve (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016) tarafından verilen taş dolgu dalgakıranlar, H_{m0}>5 m için dalga aşması değeri olan Q < 10 l/s/m değerini sağlamaktadır.

Sonuç olarak Piblok+, diğer alternatiflere göre en kısa kret genişliğine sahip olmasına rağmen standartlara uygun aşma değerini vermiştir. Accropode II Alt-1'in kret genişliği, Piblok+ kret genişliğinden hemen hemen iki kat fazla olmasına rağmen daha yüksek aşma değeri vermektedir. Dayanım sonuçlarında ise Piblok+ Accropode II ile aynı olarak sıfır hasar kriterini sağlamıştır. Sonuç olarak Piblok+ tek sıra koruma tabakası, Accropode II'den aşma açısından daha iyi sonuçlar verebilmektedir.

Rize-Artvin Havalimanı açık deniz yapıları maliyet yönünden karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak en ekonomik alternatif Piblok+ olarak öne çıkmaktadır. Tezde elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Zorlu inşaat koşullarına sahip ve 20 metre ve daha derin sulara yerleştirilen kıyı yapılarının belirlenimci ve olasılıksal tasarım yaklaşımları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
2. Bu tür koşullar altında seçilecek yapıların standartlara uygunluğunu değerlendirirken, literatüre katkıda bulunarak derin deniz kıyı yapıları için DEKYAP hibrid tasarım modeli geliştirmiştir.
3. Geleneksel tasarım yöntemlerinden farklı olarak MCS'ye dayanan güvenirlik modelinde yapısal sistemin limit durum denklemleri olasılık yoğunluk fonksiyonları ile benzeştirilmiştir.
4. Hibrid model, çeşitli derin deniz yapı alternatiflerinin karşılaştırılmasına olanak tanımıştır. Geliştirilen DEKYAP modelinde, dalga ve rüzgâr iklimi alt modelleri HYDROTAM-3D yazılımı ile birleştirilmiştir.
5. Teknolojik bir yenilik olarak, Türkiye'nin ilk ve tek yerli koruma tabakası olan Piblok+ geliştirilmiş ve Türk Patent Enstitüsü tarafından 2022/018635 numarasıyla patentlenmiştir. Ayrıca, Piblok+'ın performansı, sayısal modeller ile kıyaslanmıştır.
6. Monte Carlo Simülasyonu (MCS) kullanılarak yapılan olasılıksal tasarımlar, iklim değişikliğinin potansiyel etkilerini göz önünde bulundurarak değerlendirilmiş ve standartlara yönelik öneriler geliştirilmiştir. Analitik yöntemlerle elde edilen sonuçlar, bu yöntemlerin etkinliğini doğrulamıştır.
7. Piblok+ için yapılan patent başvuruları tamamlanmıştır. Rize-Artvin Havalimanı projesinde Piblok+ kullanılması durumunda, bölgedeki dalgaların altındaki hidrolik davranış, FLOW-3D yazılımı kullanılarak HAD yöntemiyle modellenmiştir.
8. Yapılan karşılaştırmalı analizler, belirlenimci, güvenirliğe dayalı olasılıksal ve sayısal yöntemlerin iklim değişikliği kaynaklı su seviyesi artışlarının tasarımdaki etkisini göstermiştir ve standartlarda bu değişiklikleri en iyi şekilde yansıtan güvenirliğe dayalı modelin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.
9. EurOtop (van der Meer et al., 2018) yöntemi ile elde edilen aşma değerleri Accropode II için fiziksel model sonuçları ile daha yakın sonuçlar vermesine rağmen, Piblok+ için HAD ile yapılan modelleme sonuçlarından ayrışmaktadır. Bu durum, açık deniz yapıları tasarımında fiziksel modelleme ile HAD modellemelerinin mutlaka hidrolik modelleme çalışmaları ile gerçek koşullarda gerçeklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dayanım sonuçlarında ise Piblok+, Accropode II ile aynı sıfır hasar kriterini sağlamıştır.
10. Taş dolgu koruma tabakaları içinde ekonomik bir alternatif olarak, Piblok+ öne çıkmaktadır. Tüm alternatifler karşılaştırıldığında, Accropode II alternatifleri de

Piblok+ ile yakın maliyetlere sahiptir. Çalışılan alternatifler içinde Piblok+, yurt dışı patent maliyetleri eklendiğinde ekonomik yönden ön plana çıkmaktadır.

11. DEKYAP modelinin kazıklı derin deniz yapıları için gerçekleştirilen örnek uygulamaları tezin Ek 1 bölümünde sunulmuştur.
12. Piblok geliştirme sürecinin başlangıcı biyotaklit yöntemi olmuştur. Biyotaklidi yapılan canlı deniz yıldızı olarak seçilmiştir (Ek 2). Bu fikir çalışması sonucunda Piblok ailesinin ilk üyesi Türktaş geliştirilmiştir (Ek 2). Türktaş ilk olarak parametrik yazılımlarda şekillendirilerek 1/1,33 eğim üzerine yerleştirilmiştir. Türktaş yüzeyinin düzgün olması nedeniyle dalga etkisi altında beton aşınmasının yüksek olabileceği düşünülmüş ve bir sonraki ürün olan Piblok'a geçilmiştir. Ürün geliştirme süreci tezin Ek 2 bölümünde özetlenmiştir.

Sonuç olarak ilk ürün Piblok'un patent süreci de başarıyla tamamlanmıştır ve "Sönümleyici Tek Kat Koruma Tabakası TPE: 2023/007643" patent numarası ile ilk patent alınmıştır. Piblok+, ikinci aşama çalışmalarının bir ürünü olup, Piblok'a kıyasla daha yüksek bir kilitlenme kapasitesine sahiptir.

Tez kapsamında yapılan sayısal HAD model çalışmaları sonucunda, Piblok+ benzeri tek sıra koruma tabakaları (Accropode II) ile karşılaştırıldığında, aşma, stabilite ve ekonomik açıdan iyi bir performans göstermiştir. Piblok+'ın 3D yazıcıda basılan modelleri Ek 2, Şekil 9.7'de gösterilmektedir. Daha gelişmiş bir ürün olan Piblok+'ın patent başvurusu, TPE nezdinde 2022/018635 başvuru numarası ile yapılmış ve 29.01.2024 tarihinde ikinci patentin alınması TPE tarafından uygun görülmüştür. Bu patent, 21.02.2024 tarihinde resmi patent bülteninde yayınlanmıştır (Ek 2, Şekil 9.8). Bu tez kapsamında Türk Patent Enstitüsü'nden iki patent alınmıştır.

Analiz edilen derin kıyı yapı alternatifleri arasında Piblok+ sayısal model sonuçlarına göre, eşdeğerleri ile kıyaslandığında stabilite, aşma ve fizibilite açısından başarılı bir performans ortaya koymuştur. Piblok+'ın prototip koşullarına uygulanabilecek bir tasarım olduğu ortaya konmuş ve hidrolik model deneyleri aşamasına geçilebilmesi için uygun bir yatırım olarak önerilmiştir.

KAYNAKLAR

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). Afad Türkiye deprem tehlike haritaları. *AFAD*. Ankara. 1

Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü. (2016). Kıyı yapıları planlama ve tasarım teknik esasları. *AYGM*. Ankara. 1-492

Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü. (2020). Deprem Etkisi Altında Kıyı ve Liman Yapıları Tasarımı için Esaslar. *AYGM*. Ankara. 1-125.

Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü. (2023). 2023 yılı liman ve deniz inşaatı işlerine ait birim fiyat listesi. *AYGM*. Ankara. 1-22.

Ang, A., Tang, W. (2007). *Probability concepts in engineering* (2. Baskı). New Jersey. John Wiley and Sons. 1-88

Armono, H. D., Nugroho, D. K., Mukhtasor (2021). Monte Carlo Simulation for Reliability Hydraulic Stability of Rubble Mound Breakwater Armour at Sudimoro Power Plant, Pacitan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 698(1). 1-8.

Baguelin, F., Jezequel, J. F., Le Mehaute, A. (1977, 10-15 Temmuz). *Le Penetrometre Lateral Autoforeur*. 9. Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Konferansında sunuldu, Tokyo. 27-30.

Balas, C. (2004, 14-19 Mart). *A Neural Network Model for Reliability Analysis of Rubble Mound Breakwaters*. Uluslararası Kıyı sempozyumunda sunuldu, Itajai. 1-5.

Balas, C. E., Balas, L. (2002). Risk Assessment of some Revetments in Southwest Wales, United Kingdom. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 128(5), 216–223.

Balas, C. E., Balas, L., Williams, A. T. (2004). Risk assessment of revetments by Monte Carlo simulation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 157(2), 61–70.

Balas, C. E., Ergin, A. (2002). Reliability-Based Risk Assessment in Coastal Projects: Case Study in Turkey. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 128(2), 52–61.

Balas, C. E., Koç, L., Balas, L. (2004). Predictions of Missing Wave Data by Recurrent Neuronets. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(5), 256–265.

Balas, C. E., Koç, M. L. (2006). *Reliability Analysis of Rubble Mound Breakwaters by Neural Network Model.* Uluslararası Kıyı sempozyumunda sunuldu, Itajai. 1-5.

Balas, C. E., Koç, M. L., Tür, R. (2010). Artificial neural networks based on principal component analysis, fuzzy systems and fuzzy neural networks for preliminary design of rubble mound breakwaters. *Applied Ocean Research*, 32(4), 425–433.

Balas, C. E.,Tür, R. (2010a). Belirgin Dalga Yüksekliklerinin Neuro-Fuzzy Yaklaşımı ile Tahmini: Filyos Deniz Yöresi Örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 505-510.

Balas, C. E., Tür, R. (2010b). Kıyı Tahkimat Yapılarının Güvenilirliğe Dayalı Risk Modeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 511-516.

Balas, E. A. (2023). A hybrid Monte Carlo simulation risk model for oil exploration projects. *Marine Pollution Bulletin*, 194(A), 115270.

Balas, E. A., Balas, L., (2023a). Assessing the Impacts of Wind and Wave Climate Changes in Southeastern Coast of Turkey. *5th Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration*, 5(1), 1134–1340.

Balas, E. A., Balas, L. (2023b). Wind And Wave Climate Modelling in Coastal Waters. *9th International Zeugma Conference on Scientific Research*, 9(1), 1133–1148.

Balas, L., Cebe, K. (2021). Hydrodynamic Modelling Using HİDROTÜRK Model. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 5(1), 80–107.

Balas, L., Genc, A. N., Eser, E. (2020). Transitional Waters Typology in Turkey: Melen Estuary Case Study. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 18.

Balas, L., Özhan, E. (2000). An implicit three-dimensional numerical model to simulate transport processes in coastal water bodies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 34(4), 307–339.

Balas, L., Özhan, E. (2001). Applications of a 3-D Numerical Model to Circulation in Coastal Waters. *Coastal Engineering Journal*, 43(2), 99–120.

Balas, L., Özhan, E. (2002). Three-dimensional Modelling of Stratified Coastal Waters. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, 54(1), 75–87.

Basu, D., Green, S., Das, K., Janetzke, R., Stamatakos, J. (2009, 23-25 Mart). *Navier-Stokes simulations of surface waves generated by submarine landslides: effect of slide geometry and turbulence.* SPE Americas E&P Çevre ve Güvenlik Konferansında sunuldu, Texas.

Bonakdar, L., Oumeraci, H. (2015). Pile group effect on the wave loading of a slender pile: A small-scale model study. *Ocean Engineering*, 108, 449–461.

Bradley, B. A., Cubrinovski, M., Haskell, J. J. M. (2011). Probabilistic pseudo-static analysis of pile foundations in liquefiable soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(10), 1414–1425.

Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., Hourcade, J.-C., Krey, V., Kriegler, E., Löschel, A., others. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change-Assessing transformation pathways*. (1. Baskı). Cambridge: Cambridge University Press, 413-510.

Concrete Layer Innovations. (2012). ACCROPODETM II - ECOPODETM Design Guide. *CLI*. Echirolles. 1-4

Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J. (2008). Evaluation of the HadGEM2 model. *Met Office Report*. Exeter, 1-47.

Coşkun E, Balas, L. (2018). Sea Level Changes in Izmir Bay. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(9), 68–73.

Dentale, F. (2014). Simulation of Flow within Armour Blocks in a Breakwater. *Journal of Coastal Research*, 30(3), 528.

Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics,* 40, 2123–2165.

Eleni, A. (2015). *Numerical Modelling of Coastal Structures Armoured with Concrete Units*. Doktora Tezi, Department of Earth Science and Engineering Imperial College, Londra, 1-280, Imperial College.

Ergin, A., Balas, C. E. (2006). Damage risk assessment of breakwaters under tsunami attack. *Natural Hazards*, 39(2), 231–243.

Genç, A. N., Vural, N., Balas, L. (2020). Modeling transport of microplastics in enclosed coastal waters: A case study in the Fethiye Inner Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110747.

Guo, L., Latham, J.-P., Xiang, J. (2015). Numerical simulation of breakages of concrete armour units using a three-dimensional fracture model in the context of the combined finite-discrete element method. *Computers & Structures*, 146, 117–142.

Henriques, M. J., Lemos, R., Capitão, R., Fortes, C. J. (2017). *The monitoring of rubble mound breakwaters. An assessment of UAV technology*. Proceedings of 7th International Conference on Engineering Surveying-INGEO2017, 1, 1-8.

Hetenyi, M. (1946). *Beams On Elastic Foundation Theory With Applications In The Fields Of Civil And Mechanical Engineering*. (1. Baskı). Michigan: University of Michigan Press, 1-255.

Homaei, F., Najafzadeh, M. (2020). A reliability-based probabilistic evaluation of the wave-induced scour depth around marine structure piles. *Ocean Engineering*, 196, 106818.

Horvath, R. G., Kenney, T. C. (1979, 25 Ekim). *Shaft resistance of rock-socketed drilled piers.* Derin Temeller Sempozyumunda sunuldu, Atlanta.

Huang, J., Chen, G. (2020). Experimental modeling of wave load on a pile-supported wharf with pile breakwater. *Ocean Engineering*, 201, 107149.

İnternet: Klimatoloji Şube Müdürlüğü. (2022). Türkiye İçin İklim Projeksiyonları. *Meteoroloji Genel Müdürlüğü Dergisi,* 1. URL: https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-degisikligi.aspx?s=projeksiyonlar/ Son Erişim Tarihi: 08.01.2024

İnternet: Balas, C. E., Uğurlu, A., Arslan, A. (Ocak, 2024). Kıyı yapıları için yüksek stabiliteye sahip tek kat koruma tabakası. *TPE*. URL: https://Portal.Turkpatent.Gov.Tr/Anonim/Arastirma/Patent/Islem-Dokumani-Eba?Rnd=0.1063167015055293./Erişim Tarihi: 01.03.2024

İnternet: Dünya Bankası İklim Değişikliği Bilgi Portalı. (2022). *Türkiye*, 1. URL: https://climateknowledgeportal. worldbank.org/Erişim Tarihi: 01.01.2024

İnternet: Balas, L. (2022). Hydrotam 3D Modeli. *DLTM*. URL: https://denam.gazi.edu.tr/view/page/41310/hydrotam-uc-boyutlu3d-sayisal-hidrodinamik-ve-tasinim-modeli/Erişim Tarihi: 01.04.2024

Isobe, M. (2013). Impact of global warming on coastal structures in shallow water. *Ocean Engineering*, 71, 51–57.

Karimaei Tabarestani, M., Feizi, A., Bali, M. (2020). Reliability-based design and sensitivity analysis of rock armors for rubble-mound breakwater. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(3), 136.

Ketabdari, M. J., Safarzadeh, M. F., Moniri, H. (2010, 29 Kasım-1 Aralık). *Effect of soil-structure interaction in marine monopile under combined wave, current and impact loading*. 9. Uluslararası Kıyı, Liman ve Deniz Yapıları Konferansında sunuldu, Tahran.

Lin-Ye, J., Garcia-León, M., Gràcia, V., Ortego, M. I., Stanica, A., Sánchez-Arcilla, A. (2018). Multivariate hybrid modelling of future wave-storms at the northwestern Black Sea. *Water*, 10(2), 221.

Malliouri, D. I., Memos, C. D., Soukissian, T. H., Tsoukala, V. K. (2021). Assessing failure probability of coastal structures based on probabilistic representation of sea conditions at the structures' location. *Applied Mathematical Modelling*, 89, 710–730.

Mcconnell, K., Allsop, W., Cruisckshank, Ian. (2004). *Piers, jetties and related structures exposed to waves.* (1. Baskı). Cornwall: Thomas Telford, 1-138.

Medina, J. R., Molines, J., Gómez-Martín, M. E. (2014). Influence of armour porosity on the hydraulic stability of cube armour layers. *Ocean Engineering*, 88, 289–297.

Muttray, M. (Delft Teknik Üniversitesi). (2006). Review of proposed section of Accropode and Xbloc stability for CRESS update. *TU DELFT.* Delft. 1-2.

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482.

Skovgaard, O., Skovgaard, O. (1974). *Sinusoidal and cnoidal gravity waves formulae and tables. Institue of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering*, (1. Baskı). Lyngby: Institue of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 1-150.

Uğurlu, A. (2017). *Comparison of different armour units of coastal structures in Rize-Artvin airport under overtopping and stability conditions.* Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-75.

Ülker, D., Burak, S., Balas, L., Çağlar, N. (2022). Mathematical modelling of oil spill weathering processes for contingency planning in Izmit Bay. *Regional Studies in Marine Science,* 50, 102155.

van der Meer, J. W. (1988). *Design of Breakwaters / 6. Stability of cubes, tetrapods and accropode*. (1. Baskı). Londra: Thomas Telford Publishing. 71–80.

Van Der Meer, J. W. (1995). Conceptual Desıgn Of Rubble Mound Breakwaters. *ICCE Report*. Venedik, 221–315.

Van der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B. (2018). EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related sturctures : an overtopping manual largely based on European research, but for worlwide application (Vol. 2). *Eurotop.* Delft.1-320.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change,* 109, 5–31.

Vicent, G., Tourmen, L., Vara, J. G. (1989). Diques marítimos. costes comparados de las corazas de diques construidas con bloques artificiales. economía proporcionada por la utilización del bloque accropode (R). *Revista de Obras Públicas: Organo Profesional de Los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 3283, 657–667.

Williams, A., F. (1980). *The design and performance of piles socketed into weak rock.* Doktora Tezi, Monash University, Clayton Victoria, 1-100.

Williams, A., F., Pells, P., J., N. (1981). Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone and shale. *Canadian Geotechnical Journal*, 18(4), 502-513.

Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik für polytechnische Schulen, Bauakademien, Ingenieure, Maschinenbauer, Architecten etc.* (1. Baskı). Prag: Verlag Von H. Dominicus, 1-422.

Xiong, M., Huang, Y. (2020). Static and Dynamic Reliability Analysis of Laterally Loaded Pile Using Probability Density Function Method. *Journal of Marine Science and Engineering,* 8(12), 994.

Yáñez-Godoy, H., Schoefs, F., Nouy, A., Lasne, M. (2008). Reliability analysis of two in-service monitored pile-supported wharfs during extreme storm loading events. *Proceedings of 1st International Conference on Applications Heritage and Constructions in Coastal and Marine Environment,* 1, 1-9.

Yılmaz, N., Balas, L., İnan, A. (2015). Coastal erosion problem, modelling and protection. *Ocean Science Journal*, 50(3), 589–601.

Zhang, X., Jiao, B., Hou, B. (2021). Reliability analysis of horizontally loaded pile considering spatial variability of soil parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106648.

Zhao, H. Y., Jeng, D.-S., Liao, C. C., Zhu, J. F. (2017). Three-dimensional modeling of wave-induced residual seabed response around a mono-pile foundation. *Coastal Engineering*, 128, 1–21.

ZT Zemin Teknik Ltd. Şti. (2018). Rize-Artvin Havalimanı zemin etüt raporu. *ZT*. Ankara. 1-40.

EKLER

EK-1. Kazıklı deniz yapıları

Tezin ek bölümünde ilk olarak tekil bir kazığın deplasman miktarı MCS ile hesaplanmış, olasılıksal çözüm kazıklı dalgakıran için geliştirilmiştir. Kazıkların en önemli tasarım karakteri, kazık uç deplasmanı olarak mevzuatta belirlenmiştir. Kazıklar için tasarım alt modelinin uygulanması, Rize-Artvin Havalimanı üzerinden yapılmıştır.

Kazıklı dalgakıranların performansı ve güvenirliği, yer hareketlerinin kuvveti ve frekansının rastgeleliği gibi çok sayıda belirsizlikten etkilenmektedir. (Xiong & Huang, 2020) çalışmalarında, stokastik güvenirlik metodunun kazıklı yapıların güvenirlik performansındaki belirsizlikleri daha iyi modelleyeceğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda yatay yüklü kazıkların statik ve dinamik güvenirliğini ölçmek için PDEM metodunu sunmuşlar ve elde ettikleri sonucu MCS yardımı ile kıyaslamışlardır. Sonuç olarak PDEM yönteminin önceki sismik dinamik güvenirlik analizinden 20 kat daha başarılı olduğunu belirlemişlerdir.

Son yıllarda kazıklı yapıların olasılıksal analizleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi (Zhang et al., 2021) tarafından yazılan "Zemin Parametrelerinin Uzamsal Değişkenliği Göz Önüne Alınarak Yatay Yüklü Kazıkların Güvenilirlik Analizi" başlıklı çalışmadır. Bu çalışmada, yatay yüklü kazıklar için zeminin uzamsal değişiklikleri de göz önüne alınarak bir güvenilirlik analiz metodu önerilmektedir. Kazıklı temelin deplasman ve kuvvet altındaki göçme olasılığı MCS ile değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen metot, bir vaka çalışması ile doğrulanmıştır. Vaka çalışmasında, zemin parametrelerinin uzamsal değişiminin ve yatay yüklerin belirsizliğinin göçme olasılığı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, kazık çapının büyümesinin göçme olasılığını belirgin ölçüde azaltmış olduğudur.

Dünyada temiz ve yenilenebilir enerjiye olan talep artışı, denizel rüzgârlardan enerji elde etmek için önemli bir etken olmuştur. Özellikle uzun kıyı şeritlerine sahip ülkelerde açık deniz rüzgâr türbinleri ile enerji üretmek, maliyet açısından verimlidir. (Ketabdari et al., 2010), SAP 2000 yazılımı ile rüzgâr türbini taşıyan tekil kazığa etki eden dalga, akıntı ve gemi yükleri incelenmiştir. Kazık deplasmanı, zemin-kazık etkileşimli ve etkileşimsiz olarak iki şekilde analiz edilmiştir.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Zemin-yapı etkileşimli analiz, deplasmanı %22.48 kadar artırmıştır. Bu nedenle tekil kazık analizinde daha hassas sonuç için yapı-zemin etkileşimli analiz kullanılması önerilmiştir (Ketabdari et al., 2010).

Yakın aralıklarla inşa edilen kazıklar, bazı kıyı yapılarının ve açık deniz yapılarının en önemli bileşenidir. Bu kazıklara etki eden dalga kaynaklı yükler, kazıklı kıyı yapılarının tasarımında en çok belirsizlik içeren konudur. (Bonakdar & Oumeraci, 2015) çalışmalarında, kazık grubu içerisinde yer alan tekil narin kazığın dalga yükü altındaki davranışını incelemiştir. Çalışma sonucu kazık gruplarının yerleşim türü, S_G/D ve KC kazık grubu içerisindeki tekil narin kazığı en çok etkileyen faktörler olarak öne çıkmıştır.

(Homaei & Najafzadeh, 2020) çalışmalarında; dalga parametreleri, deniz tabanı sediman koşulları, kazık gruplarının yerleşimi, kazık çevresindeki dalga kaynaklı oyulma derinliği arasındaki ilişkiyi belirlemek için tasarım parametrelerdeki rastgeleliğe bağlı belirsizlikleri göz önüne alan istatistiki bir model geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, oyulma mekanizmasının önlenmesi amacıyla kazık aralıklarının kazık çapının 4 katından daha küçük teşkil edilmesi ve kazıkların büyük çoğunluğunun akışa paralel yerleştirilmesi önerilmiştir.

(Huang & Chen, 2020) kazıklı rıhtım ve kazıklı dalgakıranı, dalga kanalında 1/30 ölçekle modelleyerek hidrolik model çalışması yapmıştır. Düzenli ve düzensiz dalga şartları altında ve deniz taban malzemesi olarak toz kömür kullanılarak yapının dalga, oyulma ve yük karakteristikleri araştırılmıştır. Yapının kazıklı olması nedeniyle dalga geçirgenliğinin %20 - %40 arasında ve oyulmanın kayda değer olduğu görülmüştür. Kazıklara etki eden yatay ve düşey basınç oranının %2 - %40 arasında olduğu ölçülmüştür (Huang & Chen, 2020).

Kazıkların deprem altındaki davranışları için son yıllarda çalışmalar yapılmıştır. (Bradley et al., 2011), sıvılaşan zeminlerde imal edilecek kazıkların eşdeğer statik (pseudo-statik) analizlerine olasılıksal çerçeve ile çözüm getirmiştir. Olasılıksal yöntem; zemin deplasmanı, üstyapı eylemsizlik kuvvetleri, zemin rijitliği ve mukavemeti gibi eşdeğer-statik analizin içerdiği belirsizlikleri modellememiştir. Bu belirsizlikler, kazık başı deplasmanı ve kazık eğilme momentinde farklılıklara yol açmaktadır. Bu durum izin verilebilen kazık başı deplasmanının aşılmasına neden olarak yapı güvenliğini tehlikeye düşürmüştür.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Mevcut kazıkların fırtına etkisi altında hareketlerinin cihazlarla gözlemlenmesi (monitoring) ve elde edilen bilgilerin bilgisayara aktarılarak işlenmesi önem taşımaktadır. Fransa'da yer alan iki adet kazıklı iskelenin fırtına yükü altındaki davranışları gözlemlenmiş ve elde edilen sonuçlar projeksiyon metodu ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada kontrol tasarım kriteri olarak kazık deplasmanı seçilmiştir. Karşılaştırma sonucu MCS ile kontrol edilmiş ve hata olasılığının kabul edilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür. (Yáñez-Godoy et al., 2008)

Açık deniz rüzgâr türbinlerine ait tekil kazık temellerinin uzun dönem dalga yükü altındaki davranışı son yıllarda araştırılmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmada (Zhao et al., 2017), tekil kazık etrafındaki deniz tabanı davranışının irdelenmesi için üç boyutlu bütünleşik bir sayısal model geliştirilmiştir. Modelde ortalama akış için RANS denklemleri kullanılmıştır. Biots konsolidasyon denklemleri ise boşluklu deniz tabanında boşluk-akışkan etkileşimi için kullanılmıştır. Sunulan model, hidrolik laboratuvar modelleri ile kalibre edilmiştir. Sayısal model sonuçları, kazık yakını sıvılaşmanın dalga ilerleme yönünde olduğunu göstermiştir.

<u>Olasılıksal alt model</u>

(Xiong & Huang, 2020) tarafından geliştirilen model, açık deniz rüzgâr türbinleri için tekil kazık (monopile) alt modeli olarak kullanılmıştır. Güvenirliğe dayalı analizlerde MCS alt modeli kullanılmıştır. MCS, limit durum denklemlerini prototipe eşdeğer koşullarda çok sayıda benzeştiren bir yöntemdir. Tasarımdaki rastgele değişkenler, olasılık dağılımları ile modellenerek belirsizlikler tanımlanmaktadır. Her tekrarda benzeştirilen tasarım, prototipte karşılaşılan çevresel koşulların örneğidir. Limit durum fonksiyonu olarak, (Hetenyi, 1946) tarafından moment ve yatay yük etkisi altındaki kazıkların uç deplasmanının belirlenmesi için önerilen Eşitlik 8.1 kullanılmıştır.

$$y(z) = \frac{2F\lambda}{k_h d}\left\{\frac{\sinh(\lambda L)\cos(\lambda L)\cosh[\lambda(L-z)] - \sin(\lambda L)\cosh(\lambda z)\cos[\lambda(L-z)]}{\sinh^2(\lambda L) - \sin^2(\lambda L)}\right\} -$$

$$\frac{2M\lambda^2}{k_h d}\left\{\left(\frac{sinh(\lambda L)[\,cos(\lambda L)\,cosh\big(\lambda(L-z)\big)\,sin(\lambda z) - \sinh\big(\lambda(L-z)\big)\,cos(\lambda z)]}{sinh^2(\lambda L) - sin^2(\lambda L)}\right) +\right.$$

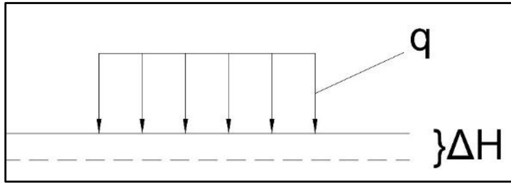
$$\left.\left(\frac{sin(\lambda L)\,[\sinh(\lambda z)\,cosh\big(\lambda(L-z)\big)\,sin(\lambda z) - \cosh(\lambda z)\,cos\big(\lambda(L-z)\big)]}{sinh^2(\lambda L) - sin^2(\lambda L)}\right)\right\}$$

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Eşitlik 8.1'den görüldüğü üzere uç deplasman, kazık boyuna bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Burada λ değeri Eşitlik 8.2'de tanımlanmıştır.

$$\lambda = \left(\frac{k_h d}{4E_p I_p}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Kazığa uygulanan yatay kuvvet F, kazığın uç kısmına gelen moment M ve yatak katsayısı k_h olarak tanımlanmıştır (Winkler, 1867). Limit durum fonksiyonu zeminin elastik olduğu ve birbirine bitişik sonsuz sayıda bağımsız yaydan oluştuğu kabulüne dayanmaktadır. Yatak katsayısı, k_h; zeminin herhangi bir noktasındaki basınç (q) ile, aynı noktanın oturması (ΔH) arasındaki oran olarak Eşitlik 8.32'de tanımlanır.



Ek-1. Şekil.1. Zemin üzerindeki basınca bağlı oturma

$$kh = \frac{q}{\Delta H}$$

MCS sonuçları fiziksel deneylerden elde edilen gözlemsel sonuçlarla benzerlik taşımaktadır. Rastgele değişkenler her tekrarda olasılık dağılımlarından benzeştirilir. MCS alt modelinin en önemli bileşeni rastgele değişkenlerin prototip koşullarının bilgisayar ortamında üretilmesidir. Her bir değişken belirlenen olasılık dağılımıyla çevresel etki koşullarında modellenir (Ang & Tang, 2007). Alt modele girilen değişkenler ve bu değişkenlere tanımlanan olasılık dağılımları görülmektedir.

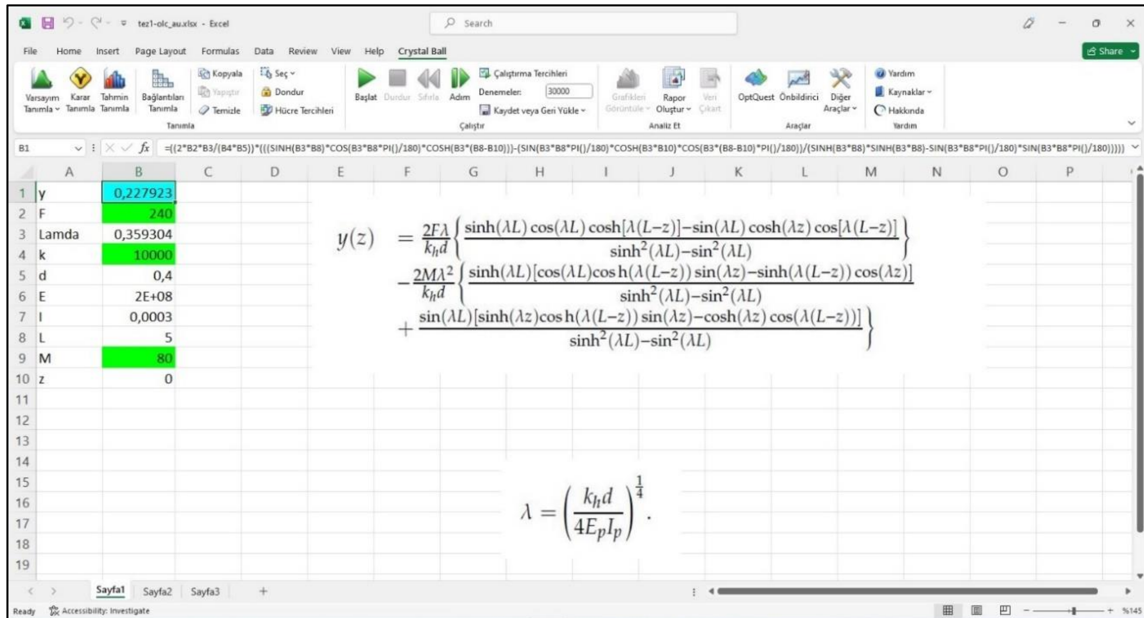
Ek-1. Çizelge. 1. Yapısal güvenirlik için kullanılan rastgele değişkenler ve olasılık dağılımları

Değişken	Olasılık Dağılımı	Ortalama	Standart Sapma
Kuvvet F (kN)	Gumbel	240	24
Moment M (kN.m)	Gumbel	80	8
Yatak katsayısı k_h (kN/m^3)	Log-normal	10.000	2000

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

görüldüğü üzere kazığa etkiyen kuvvet, moment ve yatak katsayısı değişken olarak tanımlanmıştır. Kuvvet ve moment, uç değer Gumbel olasılık dağılımı ile tariflenirken yatak katsayısı pozitif Log-normal olasılık dağılımı ile tanımlanarak modele yüklenmiştir. Kuvvet için örnek uygulamada ortalama değer 240 kN ’dur. Kazık uç momentinin ortalama büyüklüğü 80 kN.m olarak tanımlanmıştır. Yatak katsayısı ise ortalama 10.000 kN/m³ ile hesaplara dahil edilmiştir. Standart sapma değerleri kuvvet, moment ve yatak katsayısı için sırasıyla 24 kN, 8 kN.m ve 2000 kN/m³’dir.

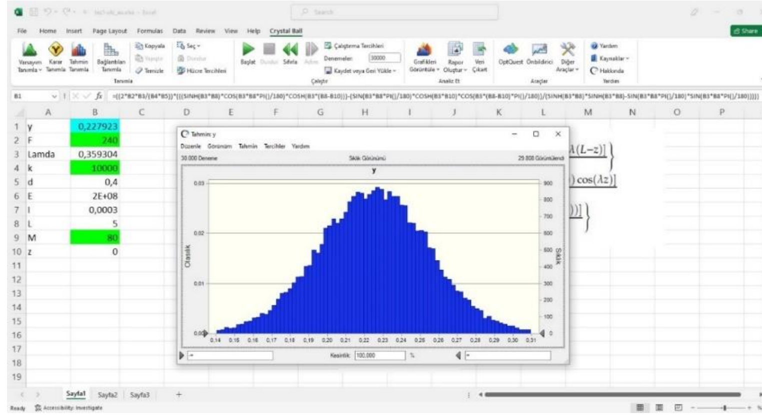
MCS alt modelinde tekil kazıklar için Eşitlik 8.1 ve Eşitlik 8.2 kullanılmıştır. Modelin arayüzü Şekil 8.2.’de verilmiştir.



Ek-1. Şekil. 2. MSC alt modelinin yazılım Crystal Ball arayüzü

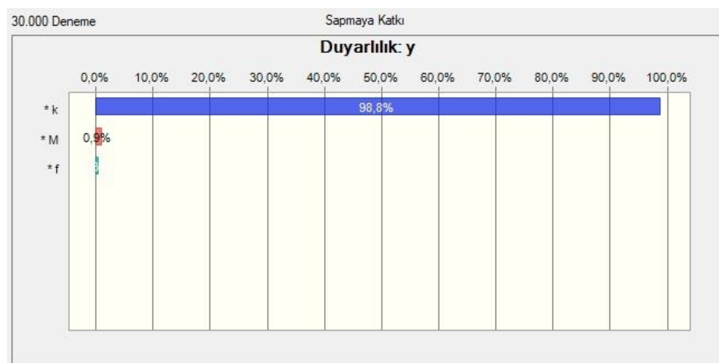
Akademik lisans ile kullanılan Crystal Ball yazılımı, tanımlanan değişkenler ve bu değişkenler için önceden tanımlanmış olasılık dağılımlarını kullanarak 30.000 deneme yapmakta ve elde edilen değerleri 30.000 deneme sonucunda vermektedir. Her bir denemeyi olası bir olayın gerçek sonucu gibi düşünmek mümkündür. Crystal Ball yazılımı ile yapılan MCS’dan elde edilen sonuçların dağılım Şekil 8.3’te görülmektedir.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil. 3. Crystal Ball yazılımı kullanılarak elde edilen MCS sonucu

MCS ile Hetenyi limit durum fonksiyonuna duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.4.ve Şekil 8.5'te değişken olarak tanımlanan kuvvet, moment ve yatak katsayısı parametrelerinin, değişkenliğe katkı ve değişkenlik ilişkisi değerleri görülebilmektedir. Şekil 8.4 ve Şekil8.5'de de görüldüğü üzere yatak katsayısı, değişkenliği %98,8 ile en fazla etkileyen parametredir. Daha doğru şekilde tahmin edilebilen moment (%0,9) ve kuvvet (%0,3) değişkenlerinin belirsizlikleri düşüktür. Bu durumdan anlaşılacağı üzere zemin parametreleri, yapı stabilitesi üzerinde en çok etkiye sahip değişkendir. Bu durum, saçılım grafiğinde de görülmektedir (Şekil8.6)



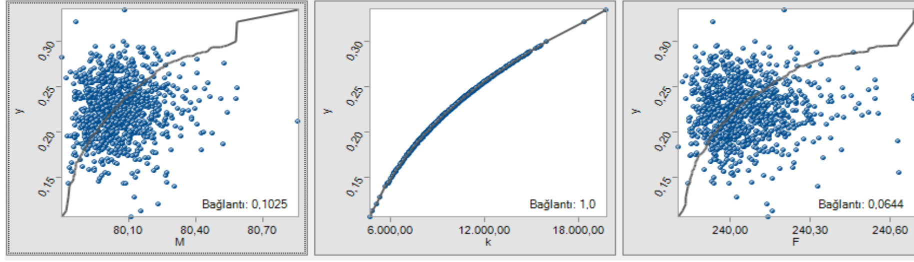
Ek-1. Şeki.4. MCS sonucu elde edilen limit durum fonksiyonu duyarlılık analizi

30.000 Deneme — Duyarlılık Verisi Görünümü

Varsayımlar	Sapmaya Katkı	Derece Bağlantısı
* k	98,8%	1,00
* M	0,9%	0,10
* f	0,3%	0,05

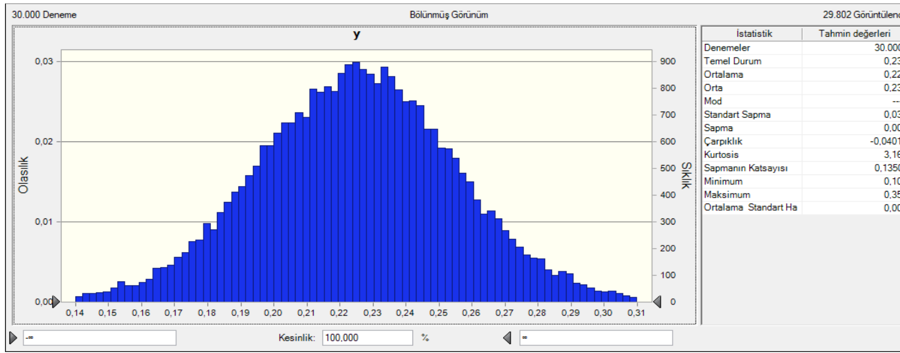
Ek-1. Şekil.5. MCS sonucu elde edilen sapmaya katkı ve derece bağlantısı değerleri

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.6. MCS yöntemine girişi yapılan değişkenlerin saçılım grafikleri

MCS alt modeli ile kazık uç deplasmanı değişkenliği incelenmiştir. (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020)'de kazık uç deplasmanı, yapısal stabilite açısından en önemli parametre olarak irdelenmektedir. Tez kapsamında da kazık uç deplasman değeri örnek bir çalışma için olasılıksal alt model ile belirlenerek belirlenimci tasarım yöntemi ile karşılaştırılmıştır. MCS yöntemi ile olasılıksal çözüm benzeştirilmiş Ek-1. Şekil'de sunulmuştur. MCS ile yapılmış olan güvenirliğe dayalı analiz, SAP 2000 yazılımı ile gerçekleştirilen belirlenimci analiz ile karşılaştırılmıştır.



Ek-1. Şekil.7. MCS ile elde edilen kazık uç deplasmanı

Kazık elemanın uç deplasmanının belirlenimci yöntemle elde edilmesi amacıyla SAP 2000 yazılımı kullanılmıştır. SAP 2000, inşaat mühendisliği alanında her türlü yapı sisteminin tasarım, analiz ve programlaması için kullanılan yazılım sistemidir. SAP 2000 yazılımı FEA tabanlı bir yazılım olup zemin parametrelerinin tanımlanması (Winkler, 1867) teoremine göre yapılmaktadır. Winkler teorisi, elastik temel veya zemin üzerinde bulunan kirişin, herhangi bir noktasında zemine verdiği taban basıncının, aynı noktadaki yer değiştirme miktarı ile doğru orantılı olduğu ve bu nedenle zeminin Hooke kanununa uygun şekilde

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

davrandığının kabul edildiği zemin teorisidir. Ülkemizde de kazıklı kıyı yapılarının projelendirilmesinde en çok kullanılan yazılım SAP 2000'dir. Bu nedenle belirlenimci çözüm için SAP 2000 yazılımı tercih edilmiştir. Tekil kazığa ait özellikler her iki yöntemde de aynı alınarak SAP 2000 yazılımına yüklenmiştir. (Winkler, 1867) teoremine göre yatak katsayısı 10.000 kN/m³ olarak tanımlanmıştır. Kazığa etkiyen kuvvet 240 kN ve moment ise 80 kN.m olarak yazılıma yüklenmiştir (Ek-1. Şekil.8.).

Tekil kazık, iki ayrı yay aralığında çözülmüştür. Bunlardan ilki 10 cm diğeri ise 1 m'dir (Ek-1. Şekil.8. ve Ek-1. Şekil.9.). Buradaki amaç, farklı yay mesafelerinde kazık uç deplasmanının alacağı farklı değerlerin karşılaştırmalı olarak belirlenmesidir. İki farklı yay aralığı için yay katsayılarının hesaplanması şu şekilde olmuştur:

K_h = 10 000 kN/m^3

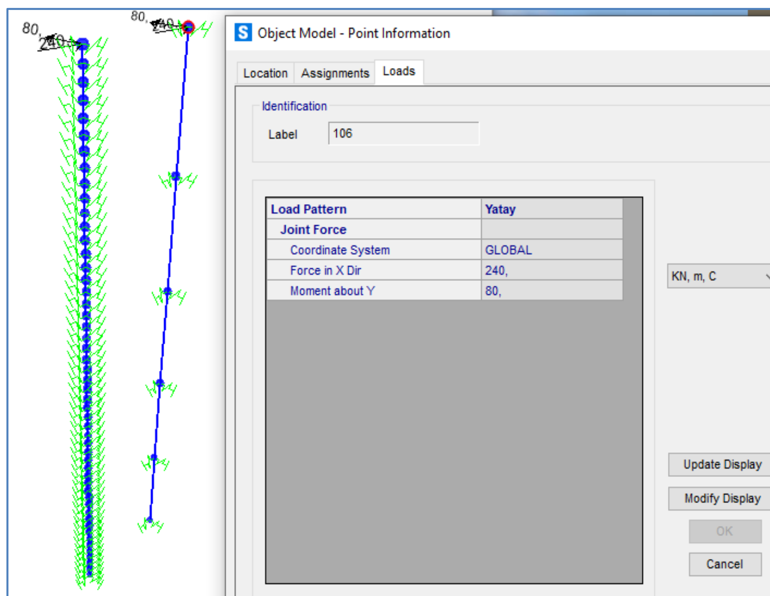
Kazık Çapı = 0.4 m

1.0m uzunluk için: 10 000*1.0*0.4 = 4 000 kN/m

10 000*1.0/2*0.4 = 2 000 kN/m

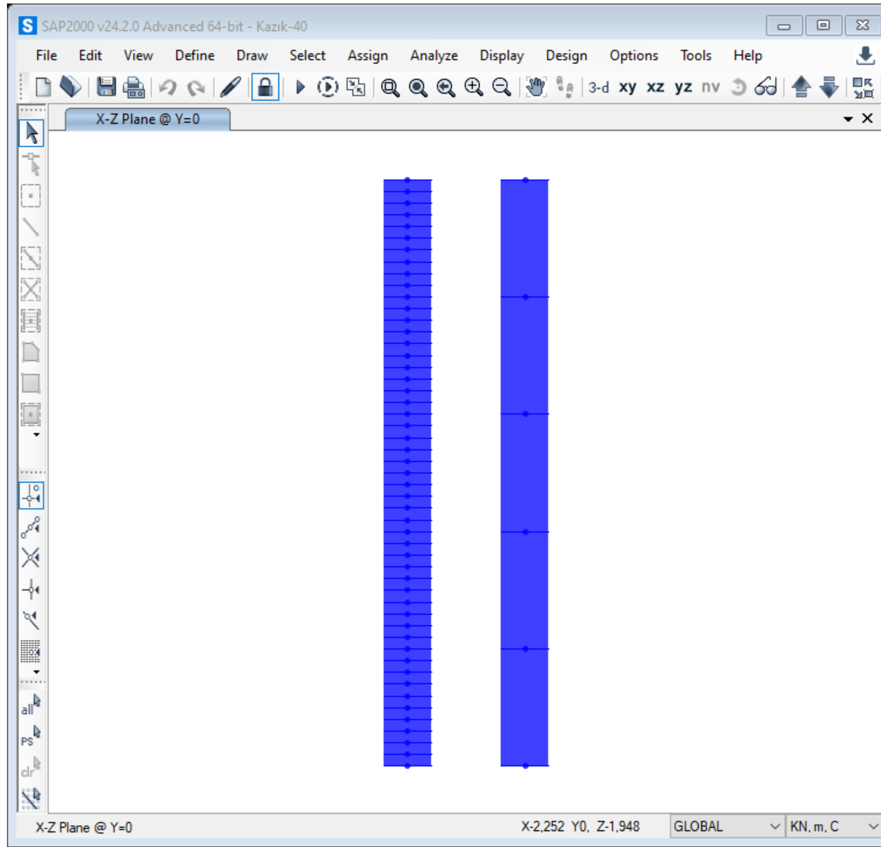
0.1m uzunluk için: 10 000*0.1*0.4 = 400 kN/m

10 000*0.1/2*0.4 = 200 kN/m



Ek-1. Şekil.8. SAP 2000 yazılımına girilen kuvvet ve moment değerleri

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.9. Zemin yayı aralıkları

Örnek çalışmada, kazık çapı 40 cm, kazık boyu 5 m, kazık elastisite modülü 200 Gpa ve atalet momenti 3*10^-4 m^4 olarak alınmıştır. Kazık malzeme özellikleri Ek-1. Şekil.10. ve Ek-1. Şekil.11'de verilmiştir. Elde edilen deplasman değerleri, Ek-1. Şekil.12. ve Ek-1. Şekil.13.'de görülebilmektedir. Yay aralığı 1 m olan kazık için uç deplasmanı 2,2 cm olarak elde edilirken yay aralığı 10 cm olan kazık için uç deplasmanı 2,4 cm olarak elde edilmiştir. Yay aralıklarının azaltılmasına bağlı olarak kazık uç deplasmanları modelde artmıştır.

Ek-1. Çizelge'de görüldüğü üzere belirlenimci yöntemle elde edilen deplasman miktarı, olasılıksal çözüme göre düşük kalmaktadır. Mevzuatta güvenirliğe dayalı tasarımın da yer alması, belirlenimci yöntemde öngörülmesi mümkün olmayan birçok belirsizliğin değerlendirilmesini sağlayacaktır.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Material Property Data

General Data
Material Name and Display Color: S355
Material Type: Steel
Material Grade: S355
Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass
Weight per Unit Volume: 6.698E-05
Mass per Unit Volume: 6.830E-09

Units: N, mm, C

Isotropic Property Data
Modulus Of Elasticity, E: 200000.
Poisson, U: 0.3
Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05
Shear Modulus, G: 76923.08

Other Properties For Steel Materials
Minimum Yield Stress, Fy: 355.
Minimum Tensile Stress, Fu: 510.
Expected Yield Stress, Fye: 391.
Expected Tensile Stress, Fue: 561.

Switch To Advanced Property Display
OK Cancel

Ek-1. Şekil.10. Kazık malzeme özellikleri

Pipe Section

Section Name: Pipe400/13
Display Color
Section Notes: Modify/Show Notes...

Dimensions
Outside diameter (t3): 400,
Wall thickness (tw): 13,185

Section
2
3

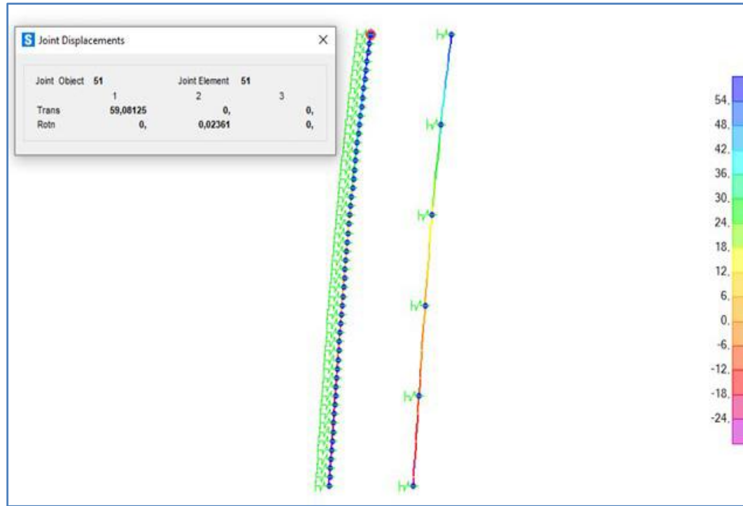
Properties
Section Properties...
Time Dependent Properties...

Material: + S355
Property Modifiers: Set Modifiers...

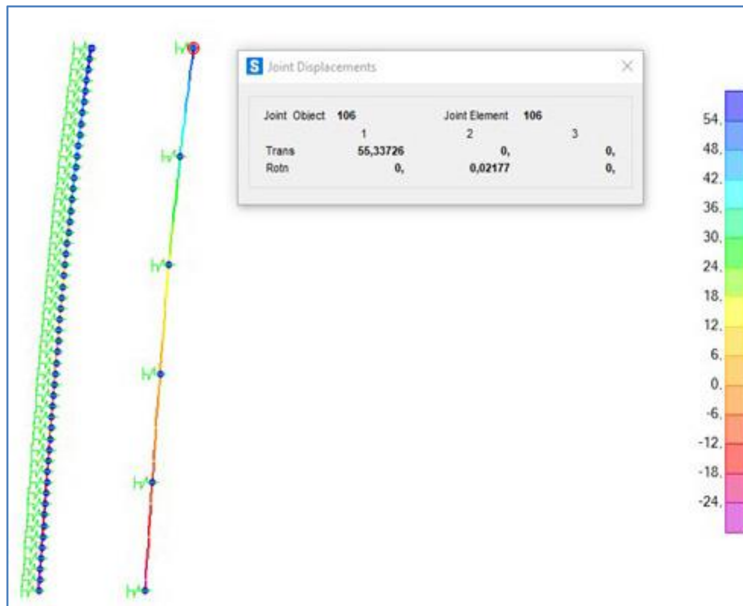
OK Cancel

Ek-1. Şekil.11. Kazık fiziksel özellikleri

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.12. 10 cm yay aralığına göre kazık uç deplasmanı



Ek-1. Şekil.13. 1 m yay aralığına göre kazık uç deplasmanı

Derin deniz rüzgâr türbinleri gibi tasarımda birçok belirsizlik (dalga, akıntı vb.) barındıran yapılarda, bu belirsizlikleri göz önüne alan güvenirliğe dayalı optimum çözüm için tezde geliştirilen model önerilmektedir. İnşaat maliyeti oldukça yüksek olan derin deniz yapılarının optimum yapısal tasarımı, kaynakların verimli kullanımı açısından gereklidir.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Ek-1. Çizelge.2. Farklı yöntemlerle elde edilen kazık uç deplasman miktarları

ÇÖZÜM YÖNTEMİ	DEPLASMAN MİKTARI (cm)
MCS ile Olasılıksal Yöntem	5,1
Belirlenimci Yöntem (10 cm yay aralığı)	2,4
Belirlenimci Yöntem (1 m yay aralığı)	2,2

Karşılaştırmalı maliyet analizi

Örnek çalışmada, Rize-Artvin Havalimanı kazıklı dalgakıran şeklindeki belirlenimci çözümü, SAP 2000 yazılımı ile yürütülmüştür. Kazık çapı 1778 mm ve çelik kazık için et kalınlığı 25 mm olarak tasarlanmıştır. Kazık aralıkları 32 cm'dir. Modele tanımlanan toplam kazık boyu 38 m olup soket boyu 5,33 m'dir (Ek-1. Şekil - Ek-1. Şekil.27.). Taşıyıcı kazıklar üzerinde 1,50 m yüksekliğinde prekast kirişler, en üst tabakada ise 15 cm döşeme betonu yer almaktadır. Beton sınıfı olarak C40, çelik türü ise S355 olarak seçilmiştir. Bu şekilde ön tasarımı yapılan kazıklı dalgakıran için daha sonra belirlenimci tasarıma geçilmiştir. İlk olarak bölgenin depremselliği belirlenmiş (AFAD, 2018) ve bölgeye ait deprem koşulları modele girilmiştir. Harita kullanıcı girdileri Ek-1. Şekil.14. ve Ek-1. Şekil.15.'te görülmektedir. Burada girişi yapılan zemin sınıfı (ZT Zemin Teknik Ltd. Şti., 2018) çalışmasından alınmıştır. (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020) Bölüm 3 Başlık 3.2 "Kıyı ve Liman Yapıları Önem Sınıfları" 3.2.3 Alt Başlık d bendi Basit Yapılar (Kıyı Tahkimatları ve Dalgakıranlar) maddesine göre tasarım yapılmıştır. Deprem tekerrür süresi şartnameye bağlı olarak 72 yıldır (DD-3). Rize-Artvin Havalimanı bölgesi, deprem haritası yerel zemin etki katsayıları ve tasarım spektral ivme katsayıları Ek-1. Şekil.16.'te görülmektedir. Bu veriler ışığında elde edilerek SAP 2000 yazılımına girişi yapılan deprem spektrumu, Ek-1. Şekil.17.'te görülmektedir. (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020)' ye göre dayanıma göre tasarım yapılmıştır.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Ek-1. Şekil.14. Rize-Artvin Havalimanı bölgesi deprem haritası

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_S)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(C_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 - 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 - 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 - 360	15 - 50	70 - 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w >$ % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($C_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler : 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer , 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Ek-1. Şekil.15. Rize-Artvin Havalimanı bölgesi deprem haritası kullanıcı girdileri

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_S					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.*					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve S_S =0.158 için F_S=1.300

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.*					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve S_1 =0.047 için F_1=1.500

Tasarım Spektral İvme Katsayıları

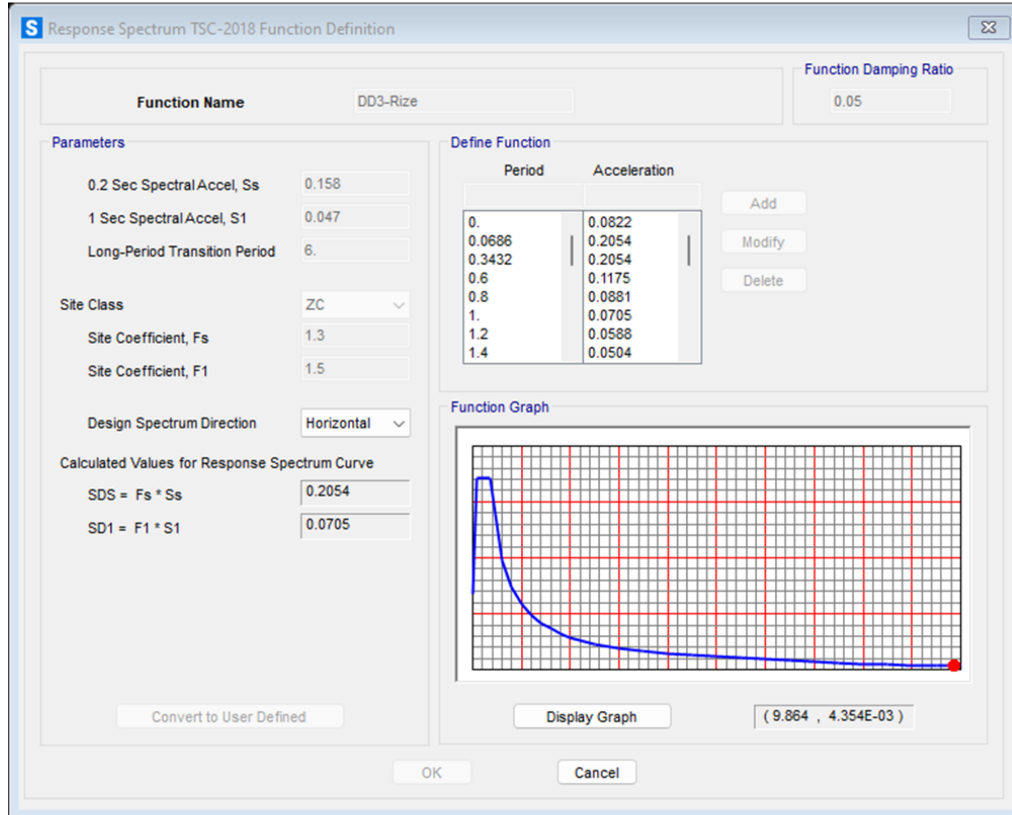
$S_{DS} = S_S\,F_S = 0.158 \times 1.300 = 0.205$

$S_{D1} = S_1\,F_1 = 0.047 \times 1.500 = 0.071$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

Ek-1. Şekil.16. Rize-Artvin Havalimanı bölgesi deprem haritası yerel zemin etki katsayıları ve tasarım spektral ivme katsayıları



Ek-1. Şekil.17. SAP 2000 yazılımına tanımlanan deprem spektrumu

Sisteme (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020)'da belirtildiği üzere su seviyesinin altındaki kazık kesimleri için ek kütleler etki ettirilmiştir. Bu kütleler şunlardır:

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

- Kazık içinde hapsolmuş olan deniz suyu kütlesi,

$w_{ek\text{-}su} = F_{iç} \times \gamma_{deniz} = F_{iç} \times 1.03\ t/m^3 = 2.345 \times 1.03 = 2.42\ t/m$

- Deniz içinde, deniz tabanına kadar olan çelik boru kesiti içinde şartnamenin kazığın hareketi esnasında yer değiştiren su kütlesi olarak tanımladığı ve kazık toplam hacmi ile deniz yoğunluğunun çarpımı olan ek su kütlesi,

$w_{kaz\text{-}su} = F_{kaz} \times \gamma_{deniz} = F_{kaz} \times 1.03\ t/m^3 = 2.48 \times 1.03 = 2.56\ t/m$

- Deniz tabanının altında kesitte kompaktlık sağlamak için kazığın tapalanma boyu ihmal edilecek olursa, (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020)'de kum ile doldurulması tavsiye edilmektedir, kazığın içinde hapsolmuş zemin kütlesi,

$w_{kum} = F_{iç} \times \gamma_{s} = F_{iç} \times 0.96\ t/m^3 = 2.345 \times 0.96 = 2.25\ t/m$

Elde edilen değerler, sistemdeki kazıklara etki ettirilmiştir (Ek-1.Şekil.18.).

Ek-1.Şekil.18. (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020) 'de tanımlanan ek su kütlesinin sisteme tanımlanması

Dalga ve akıntı nedeniyle kazıklara etkiyen yükü bulabilmek için (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016)'da gösterilen yol izlenmiştir. Bölgenin dalga ikliminin belirlenmesi için HYDROTAM-3D yazılımı kullanılmıştır. HYDROTAM-3D yazılımına ait veri giriş sayfası ve sisteme yüklenen veriler, Ek-1. Şekil.19.'da verilmektedir. Girilen veriler ışığında 100 yıl tekerrür süreli dalga yüksekliği H_s = 7,74 m olarak elde edilmiştir (Ek-1. Şekil.20.).

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Deniz alanına ait dalga gülü Ek-1. Şekil.21.'de görülmekte olup etken dalga yönü, Batı Güneybatıdır (WSW). Aylık ortalama ve uç değer dalga yükseklikleri

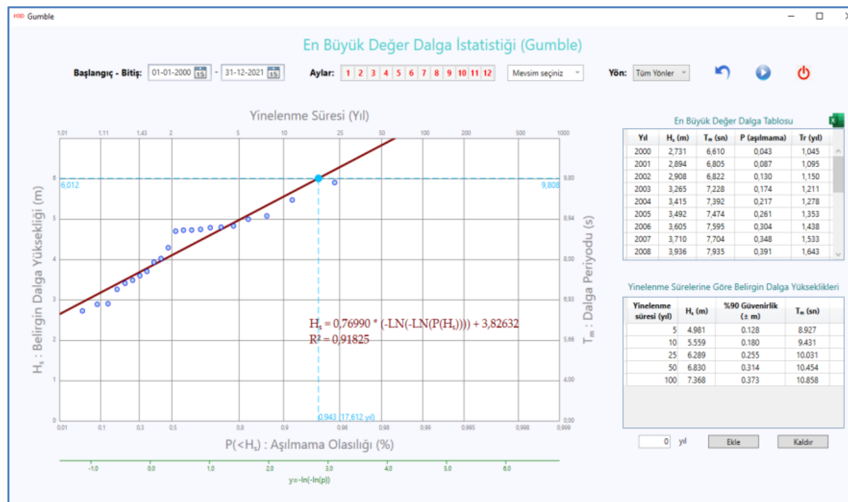
Ek-1. Şekil.22.'da, belirgin dalga yüksekliği (Hs) ile ortalama dalga periyodu (T_m) arasındaki ilişki ise

Ek-1. Şekil.23.'da verilmiştir.

H3D Çözüm Düzenle

Proje Çalışma Noktası: RİZE
Dalga Veri Kaynağı: Model | CEM Parametreleri
Dalga Tahmin Yöntemi: Ampirik
Çalışma Noktası: RİZE
Batimetri: Pazar-Batum
Rüzgar Veri Seti: ECMWF Operasyonel Arşiv 0.1° (Akdeniz)
Rüzgar Veri İstasyonu: 41,2°N - 40,9°E
Başlangıç - Bitiş: 01-01-2000 – 31-12-2021
Aylar: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 | Mevsim seçiniz
Ad: RİZE
Açıklama:
Kıyı Segmentleri
Güncelle | Vazgeç

Ek-1. Şekil.19. HYDROTAM-3D modeli

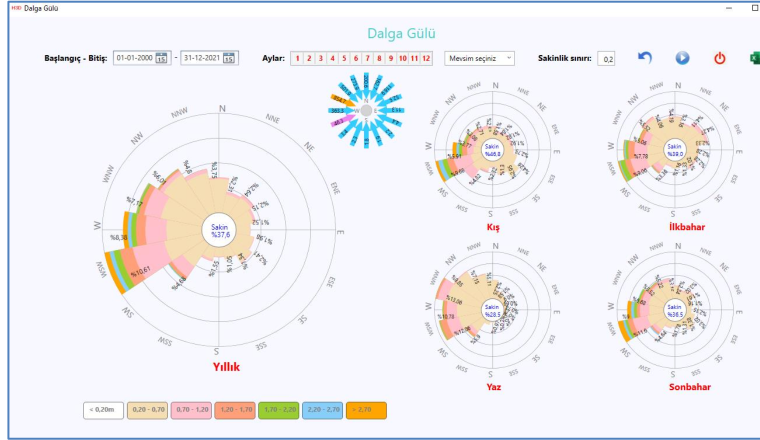


Yıl	H_s (m)	T_m (sn)	P (aşılmama)	Tr (yıl)
2000	2,731	6,610	0,043	1,045
2001	2,894	6,805	0,087	1,095
2002	2,908	6,822	0,130	1,150
2003	3,265	7,228	0,174	1,211
2004	3,415	7,392	0,217	1,278
2005	3,492	7,474	0,261	1,353
2006	3,605	7,595	0,304	1,438
2007	3,710	7,704	0,348	1,533
2008	3,936	7,935	0,391	1,643

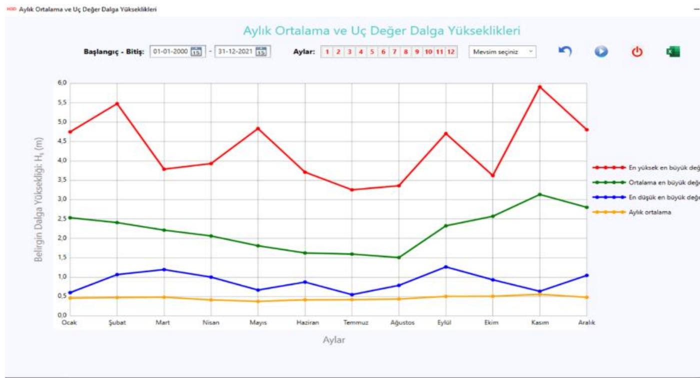
Yinelenme süresi (yıl)	H_s (m)	%90 Güvenirlik (± m)	T_m (sn)
5	4.981	0.128	8.927
10	5.559	0.180	9.431
25	6.289	0.255	10.031
50	6.830	0.314	10.454
100	7.368	0.373	10.858

Ek-1. Şekil.20. Havaalanı inşaatı yapılan deniz alanı ekstrem dalga istatistiği

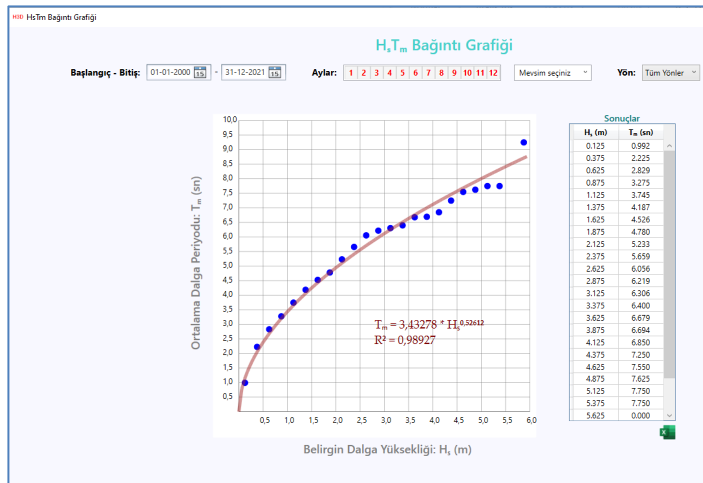
EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.21. Proje deniz alanına ait dalga gülü



Ek-1. Şekil.22. Aylık ortalama ve uç değer dalga yükseklikleri



Ek-1. Şekil.23. Belirgin dalga yüksekliği (Hs) ile ortalama dalga periyodu (T_m) arasındaki ilişki

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

(Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016)'da tekil kazığa gelen dalga yükü, Eşitlik 9.1'deki şekilde tanımlanmıştır. C_D ve C_M katsayılarına ait değerler, (Mcconnell et al., 2004) tarafından yapılan çalışmadan alınarak Ek-1. Çizelge.3.'de özetlenmiştir. C_D Ek-1. Çizelge.3.'ten 1,30 olarak seçilerek, C_M ise 2,0 alınarak analiz yapılmıştır.

$$F_i = C_D * \frac{\rho}{2} * |u| * u * D + C_M * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * \frac{du}{dt} \quad (8.4)$$

Dalga etkisi altında su parçacığının yörüngesel ivmesi Eşitlik 8.5'de tanımlanmıştır. Burada kosinüs değerini en büyük yapan başlangıç değeri (sıfır değeri) alınarak tasarımda güvenli tarafta kalınması amaçlanmıştır.

$$\frac{du}{dt} = \frac{a\omega^2 \cosh[k(z+d)]}{sinhkd} \cos(kx - \omega t) \quad (8.5)$$

Bu durumda Eşitlik 8.5, Eşitlik 8.6'ya dönüşmektedir:

$$\frac{du}{dt} = \frac{a\omega^2 \cosh[k(z+d)]}{sinhkd} \quad (8.6)$$

Eşitlik 8.5'te yer alan "a" dalga genliği olup $a = \frac{Hs}{2}$ olarak tariflenmektedir. w açısal dalga frekansı olup değeri $w = \frac{2\Pi}{T}$ 'dir. Eşitlik 8.4'de bulunan u değişkeni dalga etkisi altındaki su zerreciğinin yatay yöndeki hız bileşeni olup maksimum değeri $Umax = \frac{\Pi * Hs}{T} * tanhkd$ şeklinde ifade edilmektedir. Modelde hesaplanan değerler (Skovgaard & Skovgaard, 1974) tarafından hazırlanan Dalga Tablosundan (GWT) kontrol edilmiştir. Dalga kuvvetinin belirlenmesinde en önemli kriter, belirgin dalga yüksekliğinin (Hs) mümkün olan en doğru hassasiyetle belirlenmesidir. Rize-Artvin Havalimanı bölgesinin dalga iklimini belirlemek amacı ile HYDROTAM-3D yazılımı kullanılmış (E. A. Balas, 2023) ve tüm analizler buradan elde edilen dalga değerleri ile yürütülmüştür. Ek-1. Şekil.20.'de görüldüğü üzere Yinelenme Dönemi R_p = 50 yıl olan H_s değeri 7,74 m (% 90 güvenirlik aralığında) ve T_m değeri = 10,86 s olarak elde edilmiştir. Bu veriler altında tekil kazığa etki eden dalga kuvveti, 423 kN olarak hesaplanmıştır.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Kazığa etki eden akıntı kuvvetini hesaplamak için (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016) kullanılmıştır. Akıntıdan dolayı etkiyen kuvvet için sadece direnç kuvveti dikkate alınır. Eşitlik 8.7'de tekil kazığa etki eden kuvvet verilmiştir. Akıntı hızı, saha ölçümlerinden en yüksek 1,50 m/s olarak elde edilmiştir. Tüm bu değerler yerine konulduğunda tekil kazığa etki eden akıntı kuvvetinin en yüksek değeri 17,27 kN olarak hesaplanmıştır.

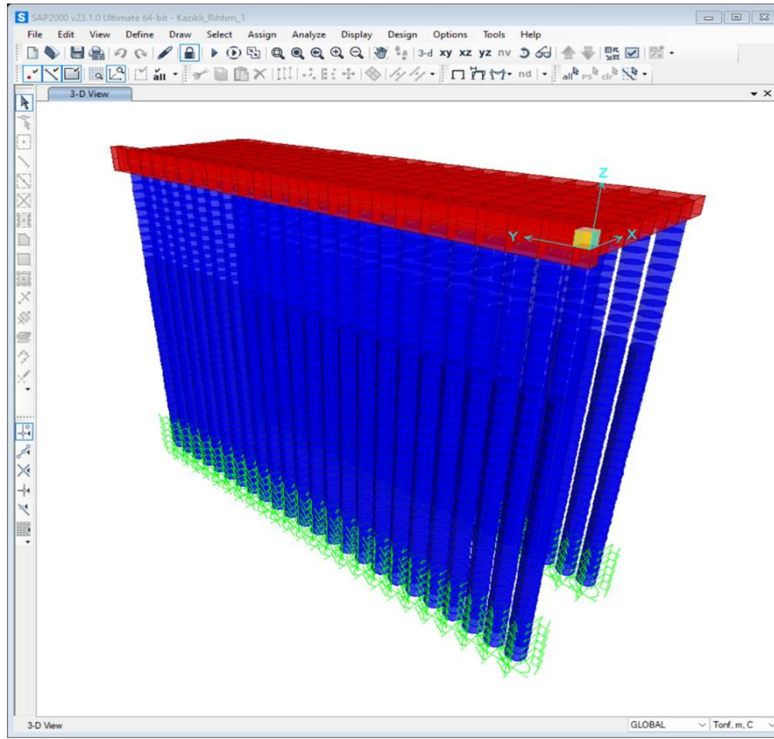
$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 D \qquad (8.7)$$

Yapısal modelin oluşacağı beton ve çelik sınıfları Ek-1. Şekil.28 ve Ek-1. Şekil.29.'da görülmektedir. Sistemin taşıyıcı bölümünü oluşturan kazıklar Ek-1. Şekil.30. ve Ek-1. Şekil.31.'de tanımlanmıştır. Modelde kullanılan yük durumları ve yük kombinasyonları (deprem dahil), Ek-1. Şekil.32. ve Ek-1. Şekil.33'de sunulmuştur. Analiz sonrası deformasyona uğrayan sistem, Ek-1. Şekil.34.'de görülmektedir.

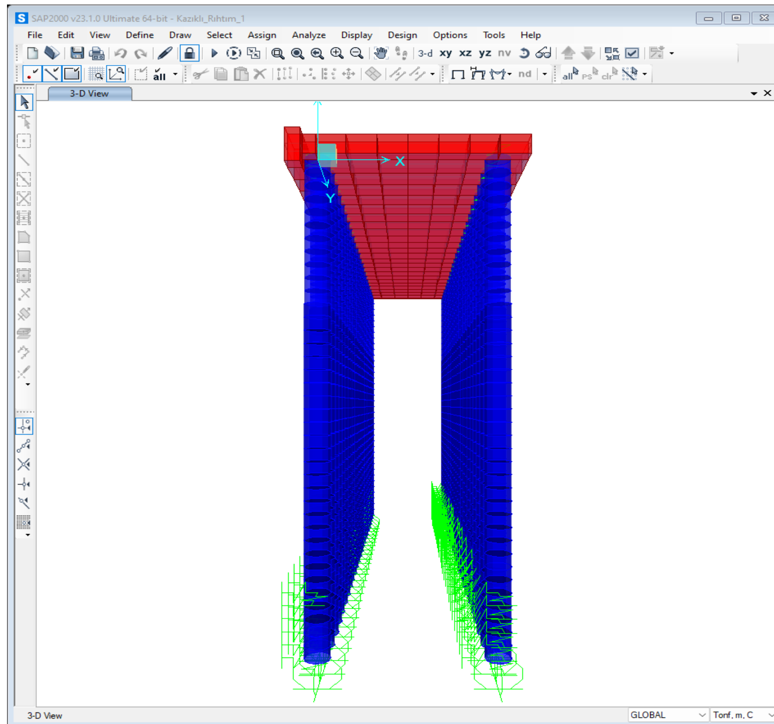
Ek-1. Çizelge.3. Farklı kazık geometrileri için direnç ve atalet kuvveti katsayıları (McConnell vd., 2003)

Kesit		Direnç katsayısı, C_D		Atalet katsayısı, C_M
Dairesel		Cilalı kazık (Düzgün yüzeyli)	Pürüzlü	
Det Norske Veritas (1991) dalga için		Min. 0.7	Maks. 1.1	-
American Petrol Enstitüsü (1993) dalga için		0.65	1.05	-
Nath (1984) kararlı akım, yüksek Re sayısı		0.7	1.05	-
Sarpkaya ve Çakal (1983), dalga için		0.6 -2.5 Ortalama 1.3		2.0
Sarpkaya ve Storm (1985) dalga ve akıntı birlikte (KC=60)		0.9	1.5	
Sarpkaya (1986) (KC=40)		0.7	1.2-1.4	
Kare	→ □	2.0		2.5
	→ ◇	1.6		2.2
Yuvarlatılmış köşeli kare	→ ▢	0.6		2.5
	→ ◇	0.5		2.5

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

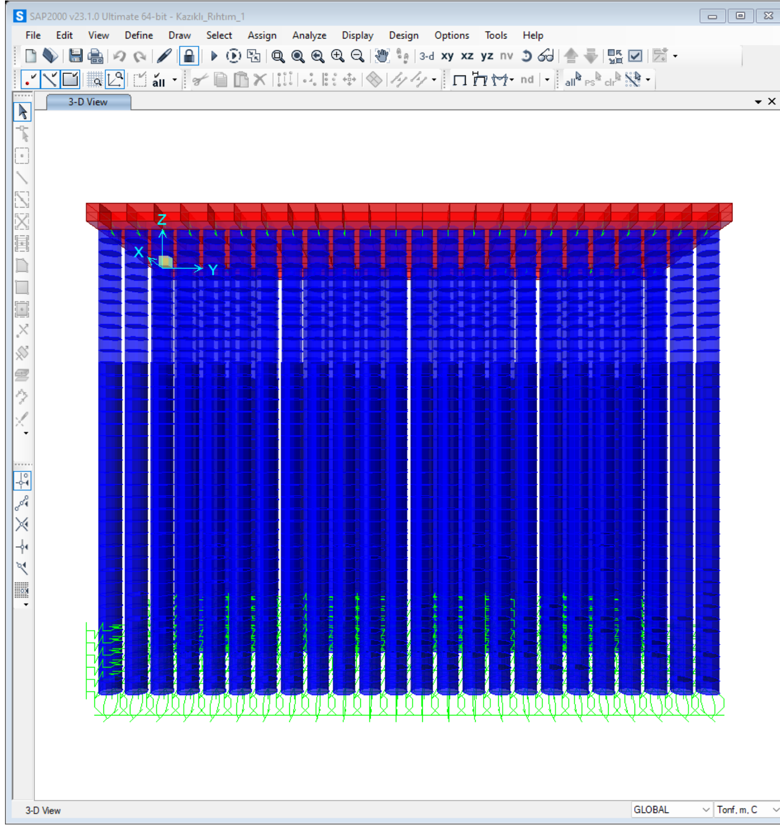


Ek-1. Şekil.24. SAP 2000 modelinde tanımlanan açık deniz dalgakıranı

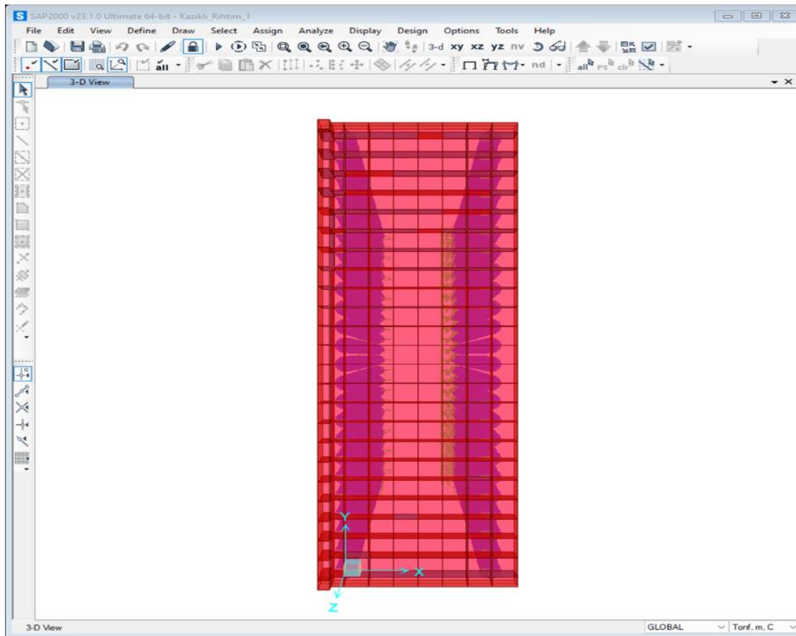


Ek-1. Şekil.25. SAP 2000 modelinde tanımlanan açık deniz dalgakıran kesiti

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.26. SAP 2000 modelinde tanımlanan açık deniz dalgakıran



Ek-1. Şekil.27. SAP 2000 modelinde tanımlanan açık deniz dalgakıran kesiti

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color	C40
Material Type	Concrete
Material Grade	C40
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume	2.500E-05
Mass per Unit Volume	2.548E-09

Units: N, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E	34000.
Poisson, U	0.2
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1.000E-05
Shear Modulus, G	14166.667

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c	40.
Expected Concrete Compressive Strength	40.

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Ek-1. Şekil.28. Yapısal modele tanımlanan beton sınıfı (C 40)

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color	S355
Material Type	Steel
Material Grade	S355
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume	7.697E-05
Mass per Unit Volume	7.849E-09

Units: N, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E	200000.
Poisson, U	0.3
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	76923.08

Other Properties For Steel Materials

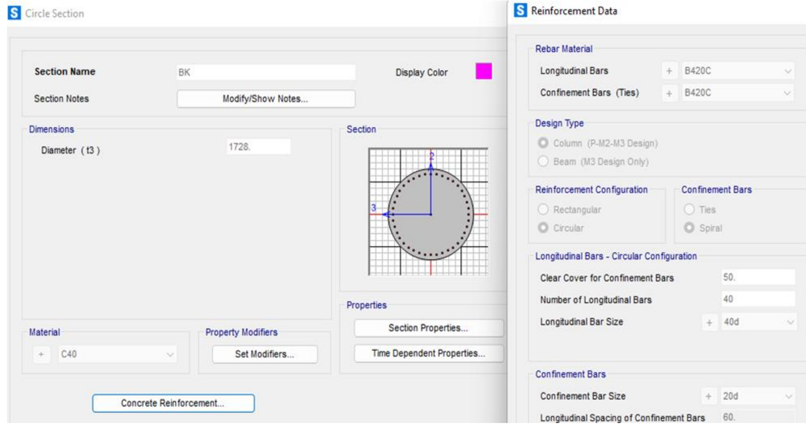
Minimum Yield Stress, Fy	355.
Minimum Tensile Stress, Fu	510.
Expected Yield Stress, Fye	390.5
Expected Tensile Stress, Fue	561.

Switch To Advanced Property Display

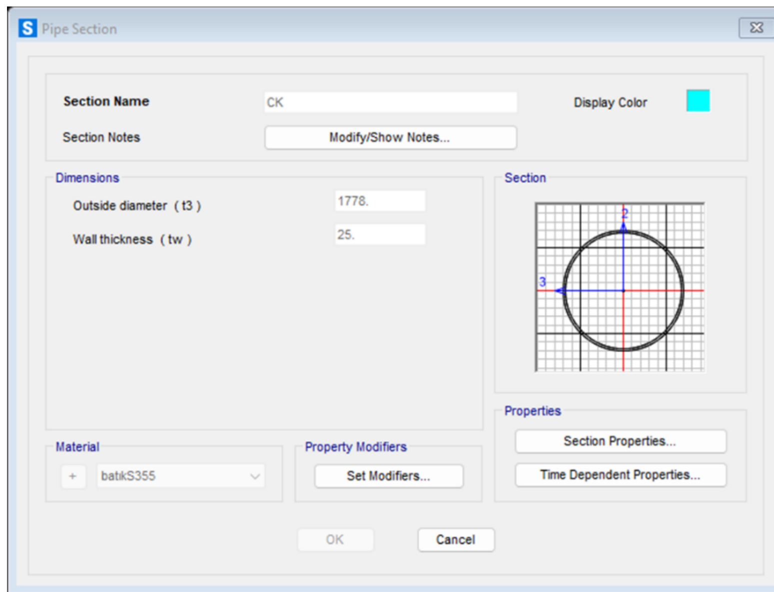
OK Cancel

Ek-1. Şekil.29. Yapısal modele tanımlanan çelik sınıfı (S 355)

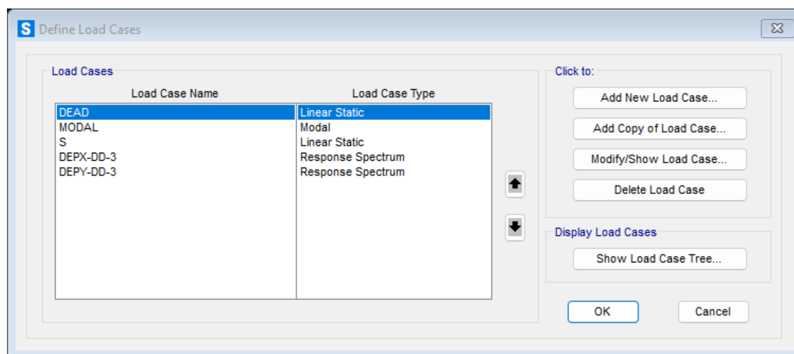
EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.30. Yapısal modelde tanımlanan betonarme kazık



Ek-1. Şekil.31. Yapısal modelde tanımlanan çelik kazık



Ek-1. Şekil.32. Modelleme çalışmalarında kullanılan yük koşulları

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Combination Definitions

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

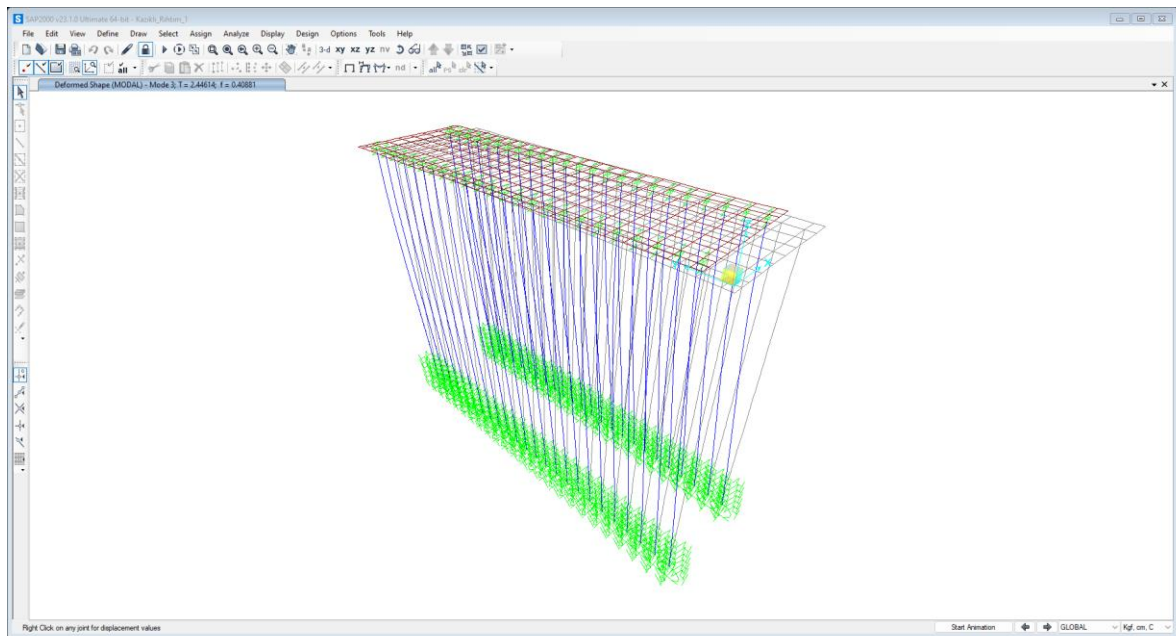
Units: As Noted — Combination Definitions

Filter:

ComboName Text	ComboType	AutoDesign Yes/No	CaseType Text	CaseName Text	ScaleFactor Unitless	SteelDesign Text	ConcDesign Text
EdHx	Linear Add	No	Response Spectrum	DEPX-DD-3	1	None	None
EdHx			Response Spectrum	DEPY-DD-3	0.3		
EdHy	Linear Add	No	Response Spectrum	DEPX-DD-3	0.3	None	None
EdHy			Response Spectrum	DEPY-DD-3	1		
COMB1	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1.4	Strength	Strength
COMB2	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1.2	Strength	Strength
COMB2			Linear Static	S	1.6		
COMB3	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1.2	Strength	Strength
COMB3			Response Combo	EdHx	1		
COMB4	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1.2	Strength	Strength
COMB4			Response Combo	EdHy	1		
COMB5	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	0.9	Strength	Strength
COMB5			Response Combo	EdHx	1		
COMB6	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	0.9	Strength	Strength
COMB6			Response Combo	EdHy	1		
ENV	Envelope	No	Response Combo	COMB1	1	None	None
ENV			Response Combo	COMB2	1		
ENV			Response Combo	COMB3	1		
ENV			Response Combo	COMB4	1		
ENV			Response Combo	COMB5	1		
ENV			Response Combo	COMB6	1		

Record: << < 10 > >> of 21 — Add Tables... — Done

Ek-1. Şekil.33. Modelleme çalışmalarında kullanılan yük kombinasyonları



Ek-1. Şekil.34. Analiz sonrası elde edilen, deformasyona uğrayan yapısal model

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Analizlerde dayanıma göre tasarım yapılması nedeniyle sonuçlar kazık taşıma gücü ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak en yüksek reaksiyon kuvveti 298,68 t olarak Ek-1. Şekil.35.'te belirlenmiştir.

TABLE: Joint Reactions						
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3
Text	Text	Text	Text	Tonf	Tonf	Tonf
6783	COMB2	Combination		103,014	-2,3579	298,6809
6785	COMB2	Combination		103,7801	-2,2859	298,1762
6781	COMB2	Combination		102,2795	-2,3682	296,842

Ek-1. Şekil.35. SAP 2000 modelinde elde edilen en yüksek reaksiyon kuvveti (ton).

Kazık taşıma gücü için Eşitlik 8.8, Eşitlik 8.9 ve Eşitlik 8.10 kullanılmıştır.

$$Q_{ult} = Q_s - W \text{ (Basınç Yüklemesi)} \tag{8.8}$$

$$Q_{ult} \leq 0{,}70 * Q_s + W \text{ (Çekme Yüklemesi)} \tag{8.9}$$

$$Q_{ult} = \sum_{i=1}^{n} Q_{si} * A_{si} \tag{8.10}$$

Burada "A_{si}" i. tabakanın m^2 olarak kazık çevre alanıdır.

Q_{si} i. tabakanın sürtünme kuvvetidir. (ZT Zemin Teknik Ltd. Şti., 2018) saha çalışmasından serbest basınç dayanımı (q_u) 165,30 kgf/cm^2 olarak alınmıştır.

Kazığın sürtünme direncinin belirlenmesi için (Horvath & Kenney, 1979), (Williams, 1980) ve (Williams & Pells, 1981) yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan ilki (Williams & Pells, 1981)'dir.

$$f_s = \alpha * \beta * q_u \tag{8.11}$$

α = direnç azaltma faktörü (0,10)

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

β = süreksizlik azaltma faktörü (0,65)

f_s = 10,74 kgf/cm^2 = 107,4 tf/m^2

(Williams, 1980) tarafından verilen Eşitlik 6.5 ile elde edilen sonuç aşağıdadır:

$$f_s = 1{,}842 * qu^{0{,}367} \quad (8.12)$$

f_s = 120 tf/m^2 (Horvath & Kenney, 1979) ise Eşitlik 8.10 'u önermişlerdir:

$$f_s = 0{,}67 * qu^{0{,}5} \quad (8.13)$$

f_s = 86 tf/m^2

Güvenli bölgede kalabilmek için en küçük sürtünme direnci olan 86 tf/m^2 seçilmiştir. Kazık çapı, 1778 mm olarak ön tasarımda seçilmiştir. Kazık soket boyu, Kanada Geoteknik Topluluğu tarafından çapın 3 katı olarak önerilmektedir. Bu durumda soket boyu L_s = 5,33 m olarak elde edilmektedir. Kazığın sürtünme direnci, Eşitlik 8.14 ile hesaplanmıştır.

$$Q_s = L_s * D * \pi * f_s \quad (8.14)$$

Q_s = 2562,3 t

Tek bir kazığa ait taşıma gücü, grup kazıkların etkisi ile farklı olacağından Eşitlik 8.15'te yer alan Converse-Labarre denklemiformülü ile grup etkisi göz önüne alınmıştır:

$$\eta = 1 - \theta \left[\frac{(n-1)m+(m-1)n}{90\, mn}\right] \quad (8.15)$$

m = gruptaki kazık sırası sayısı = 1

n = bir sıradaki kazık sayısı = 24

θ = arctan (D/s) = 40,25°

D = kazık çapı = 1,778 m

S = kazık aralığı = 2,10 m

η = 0,57

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

$\eta * Q_s = 0,57 * 2562,3 = 1460,50$ t

Kazık Emniyet Yükü:

$Q_{ALL} = \Sigma\ Q_{ult} / F_S$

$Q_{ALL} = 1460,5 / 3 = 486$ t (basınç)

$Q_{ALL} = 0,70 * Q_s = 0,70 * 1460,5 / 3 = 340$ t (çekme)

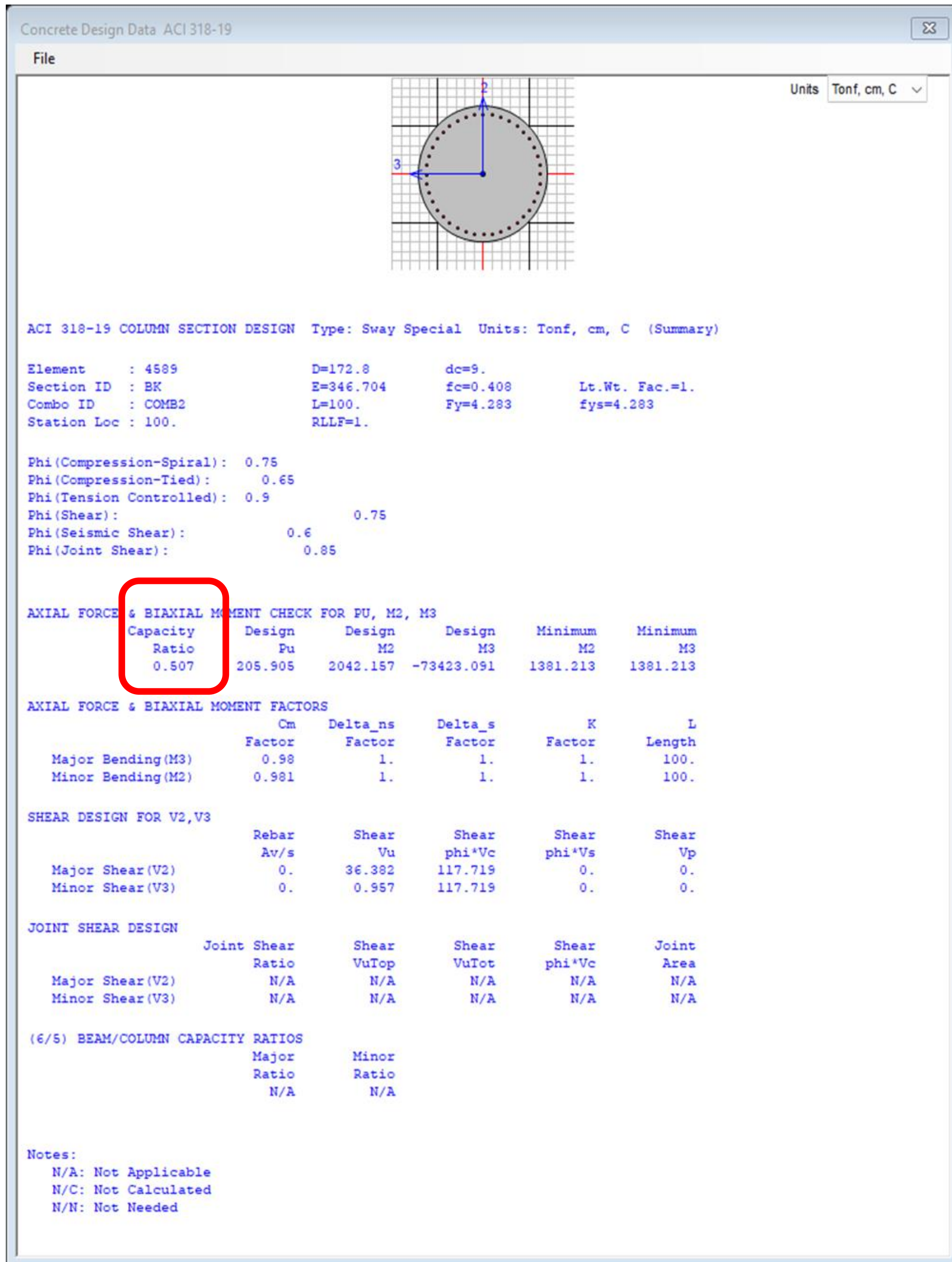
(Baguelin et al., 1978) güvenlik katsayısı için 2 önermelerine rağmen projenin önemi nedeniyle güvenlik katsayısı 3 alınmıştır. Ek-1. Şekil.35.'te görüldüğü üzere en büyük reaksiyon kuvveti 298,68 t olup bu değer 486 t değerinden düşüktür ve dolayısıyla yapı, kendisine etkiyen yükleri güvenle taşımaktadır.

Çelik ve betonarme kompozit kazıkların taşıma kapasiteleri Ek-1. Şekil.36. ve Ek-1. Şekil. 37.'de verilmiştir. Ek-1. Şekil.36.'da görüldüğü üzere betonarme kompozit kazığa taşıma kapasitesinin yarısından daha düşük yük gelmiştir ve güvenli taraftadır. Çelik kazık, talep edilen taşıma gücünün 4 katı taşıma kapasitesine sahip olup kesme kontrolü de pozitif sonuç vermiştir.

Sonuç olarak Rize-Artvin Havalimanı kazıklı dalgakıranı örnek çalışmada emniyetli şekilde tasarlanmıştır. Tasarım (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020) şartlarına göre yapılmış ve basit yapı sınıfının dayanıma göre, tasarımda talep edilen gereklilikler yerine getirilmiştir.

Yapı emniyetli şekilde tasarlandıktan sonra yapı bünyesine giren imalat kalemleri (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2023) birim fiyatları ile hesaplanarak 1 m başına düşen maliyet USD olarak belirlenmiştir (Ek-1. Çizelge). Maliyet analizinden görüldüğü üzere kazıklı dalgakıranın 1 m başı maliyeti 91.185,02 USD'dir. Çizelge 6.8 ile karşılaştırıldığında, Rize-Artvin Havalimanı Koruma Yapılarının Maliyeti içerisinde kazıklı koruma tabakası alternatifi, en yüksek maliyetli koruma tabakası olmaktadır. Ancak kazıklı dalgakıranlar zemin stabiliteleri ile depreme dayanıklı yapılar olarak gerek duyulduğunda maliyetten bağımsız olarak inşa edilebilmektedirler.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.36. Betonarme kompozit kazığın taşıma kapasitesi tahkiki

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Steel Stress Check Data AISC 360-10

File

Units Tonf, cm, C

```
AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK    (Summary for Combo and Station)
Units  :  Tonf, cm, C

Frame :  4580     X Mid:  1200.     Combo:  COMB2          Design Type:  Column
Length:  100.     Y Mid:  2940.     Shape:  CK             Frame Type:  SMF
Loc   :  100.     Z Mid:  -1150.    Class:  Non-Compact    Princpl Rot: 0. degrees

Provision: LRFD   Analysis: Effective Length
D/C Limit=0.95    2nd Order: Amplified 1st Order
Ignore Seismic Code?  Yes           Ignore Special EQ Load?  Yes       D/P Plug Welded?  Yes

SDC: D            I=1.              Rho=1.            Sds=0.5
R=8.              Omega0=3.         Cd=5.5
PhiB=0.9          PhiC=0.9          PhiTY=0.9         PhiTF=0.75
PhiS=0.9          PhiS-RI=1.        PhiST=0.9

A=1376.803        I33=5289735.565   r33=61.984        S33=59502.087     Av3=688.495
J=10579471.13     I22=5289735.565   r22=61.984        S22=59502.087     Av2=688.495
E=2039.432        Fy=3.62           Ry=1.1            z33=76830.433
RLLF=1.           Fu=5.201                            z22=76830.433

HSS Welding: ERW  Reduce HSS Thickness? No


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS  (Combo COMB2)
    Location             Pu        Mu33        Mu22         Vu2         Vu3          Tu
    100.           -258.995   -40679.137    1181.152     36.382      -0.957          0.

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO    (H1-1b)
    D/C Ratio:     0.266 = 0.084 + 0.181 + 0.005
                         = (1/2)(Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN    (H1-1b)
    Factor                 L          K1          K2          B1          B2          Cm
    Major Bending        74.          1.          1.       1.154          1.          1.
    Minor Bending        74.          1.          1.       1.154          1.          1.

                        Lltb        Kltb          Cb
    LTB                  74.          1.       1.037

                          Pu     phi*Pnc     phi*Pnt
                       Force    Capacity    Capacity
    Axial           -258.995    1534.694    4485.615

                          Mu      phi*Mn      phi*Mn      phi*Mn
                      Moment    Capacity      No LTB        Cb=1
    Major Moment  -40959.181   226106.05   226106.05  250313.032
    Minor Moment    1181.016   226106.05

                          Tu          Tn      phi*Tn
                      Moment    Capacity    Capacity
    Torsion               0.   246204.88  221584.392

SHEAR CHECK
                                               Vu      phi*Vn      Stress      Status
                                            Force    Capacity       Ratio       Check
    Major Shear        36.382    1345.684    0.027          OK
    Minor Shear         0.957    1345.684    0.001          OK
```

Ek-1. Şekil. 37. Çelik kazığın taşıma kapasitesi tahkiki

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları

Ek-1. Çizelge.4. Kazıklı kıyı yapısında m başına maliyet

İmalat	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Toplam (TL)	Toplam (USD)
15 cm kalınlığında saha betonu	m²	14,13	472,50	6.676,43	214,95
Şahmerdanın iş başına getirilip hazırlanması	adet	0,003	369.273,75	1107,82	35,67
Ø1778/25 çelik borudan kazık imali	ton	46,93	38.758,29	1.818.926,55	58.560,76
Çelik boru kazıkların manipülasyonu	ton	47,05	1.405,99	66.151,83	2.129,77
Dış çapı 70” çelik boru eklenmesi	adet	1,61	25.457,21	40.986,11	1.319,56
Dış çapı 70" lik çelik boru çakılması	m	32,92	2.988,63	98.395,70	3.167,55
Düz yüzeyli beton veya betonarme kalıbı	m²	12,58	340,68	4.285,75	137,96
Sacdan beton kronman kalıbı	m²	7,97	321,88	2.565,38	82,58
-5 m’den fazla su derinliği olan yerlerde iskele boşluğu	m³	320,34	309,33	99.090,77	3.189,73
Betonarme için Ø8-Ø12 mm ince nervürlü çeliği	ton	0,01	26.318,95	263,19	8,47
Betonarme için Ø14-Ø26 mm ince nervürlü çeliği	ton	11,72	25.828,95	302.715,29	9.744,39
Çeşitli demir imalat ve yerine konması	kg	384,96	102,99	39.647,03	1.276,24
Kazık başlık ve çarıkların yapılması ve yerine konması	kg	901,40	103,88	93.637,43	3.014,18
Dökme çelik baba ihzarı	kg	8,17	40,85	333,74	10,74
Babalar için ankraj Düzeni ve palplanş gergi çubuklarının imali ve ihzarı	kg	1,90	119,01	226,12	7,28
Polietilen kaplama	m²	43,96	327,79	14.409,65	463,85
Katodik koruma	adet	1,01	24.687,74	24.934,62	802,64
C50 betonu	m³	19,18	2.084,89	39.988,19	1.287,22
C35 betonu	m³	22,47	7.872,39	176.892,60	5.694,16
Prekast kiriş montajı	m³	2,84	132,26	375,62	12,09
Prekast kiriş kalıbı	m²	11,43	68,57	783,75	25,23
GENEL TOPLAM (USD)					91.185,02

Sonuç ve değerlendirmeler

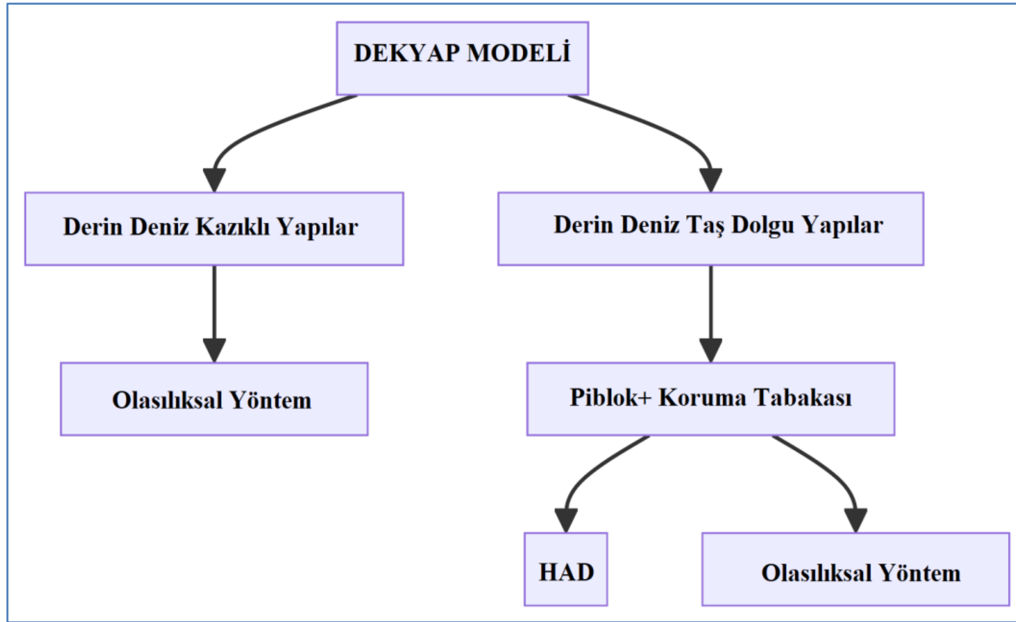
Kazıklı derin deniz yapılarına etkiyen ana yükler; dalga, akıntı, gemi bağlama, gemi yanaşma ve deprem kuvvetleridir. Bu kuvvetler, alt modelde hesaplanarak kazığa etkitilmiştir. Yanaşma kuvveti gemi tiplerine göre hesaplanmakta ve maksimum usturmaça aralığı kontrolü yapılmaktadır. Deprem kuvveti için spektrum tanımlanmaktadır. Modların kütle katılım oranlarına göre deprem kuvvetleri, sisteme etkimektedir. Deprem için kütle hesabında, sistemdeki elemanların zatî yükü hesaplamaktadır. Zatî yüke ilave olarak deprem kütlesine katılması gereken kazık içi beton ağırlığı, ilave su ağırlığı tanımlanmaktadır. Zatî ve raylı vinçlerin ağırlıkları, kütle katılım katsayısı ile dikkate alınmaktadır. Zemin parametreleri, saha çalışmalarından zemin sınıfına göre belirlenmektedir.

Kazığa etki eden akıntı ve dalga kuvvetleri Morrison yöntemi ile çözümlenmektedir. Dalga ve akıntı iklimleri HYDROTAM-3D modeli ile belirlenmekte, böylece hibrit yapısal model, çevresel yük modeli ile ilişkilendirilerek tüm çevresel yüklerin üç boyutlu hidrodinamik

model ile elde edilmesini sağlamaktadır. Tezin yenilikçi yönlerinden biri, MCS alt modelinin HYDROTAM-3D üç boyutlu sayısal modelle entegrasyonudur. HYDROTAM-3D ve MCS modelleri ilişkilendirilerek dayanıma göre tasarım yapılmakta ve kazık taşıma gücü karşılaştırılmaktadır. Kazıklara ait soket sürtünme direnci belirlenerek reaksiyon kuvvetinin karşılanma analizi yapılmaktadır. Kazığın sürtünme direncinin belirlenmesi için (Horvath & Kenney, 1979), (Williams, 1980) ve (Williams & Pells, 1981) yöntemleri kullanılmaktadır. Tek bir kazığa ait elde edilen taşıma gücü, grup kazıkların bulunması durumunda farklı olacağı için Converse-Labarre grup etkisi göz önüne alınmaktadır. MCS yöntemi ile kazık uç deplasmanının belirlenmesinde kazığa etkiyen kuvvet, moment ve yatak katsayısı değişken olarak tanımlanmış ve olasılık dağılımları ile modellenmiştir. Olasılıksal alt model ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve kuvvet, moment ve yatak katsayısının değişkenliğe etkisi ve ilişkisi ortaya konmuştur. Zemin parametreleri ve yatak katsayısı, benzeşimde en yüksek etkiye sahiptir. Bu durum korelasyon ve saçılım grafikleri ile de ortaya konmuştur. (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2020)'de kazık uç deplasmanı, yapısal stabilite açısından en önemli parametre olarak irdelenmektedir. Kazık uç deplasman değerleri olasılıksal alt modelde Hetenyi limit durum fonksiyonu ile modellenmiştir.

Sonuç olarak, kazıklı derin deniz yapılarının tasarımı için DEKYAP modeli geliştirilmiştir. DEKYAP Model yapısı Ek-1. Şekil'de sunulmuştur. Kazıklı derin deniz yapıları hibrit risk tasarım modeli örnek bir uygulama ile sunulmuştur. Açık deniz yapıları birçok belirsizlik barındıran maliyetli yapılardır ve bu belirsizlikleri göz önüne alan, güvenirliğe dayalı tasarımın, yapı stabilitesinde optimum maliyetli çözüm sağlamak için önemli olduğu görülmüştür. İnşaat maliyeti oldukça yüksek olan bu yapıların optimum yapısal analizi, kaynakların verimli kullanımı açısından gereklidir.

EK-1. (devamı) Kazıklı deniz yapıları



Ek-1. Şekil.38. DEKYAP Model Yapısı

EK-2. Piblok + geliştirme süreci

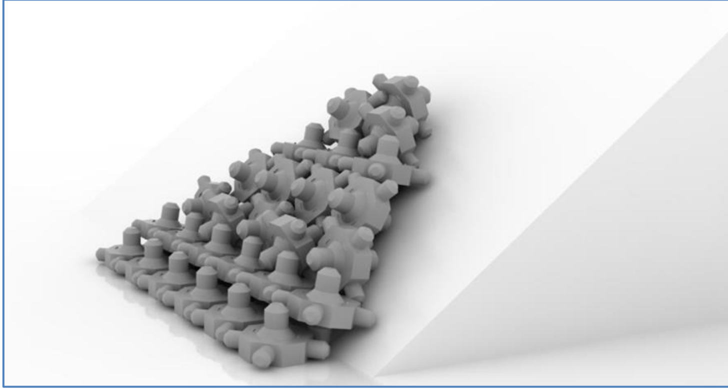
Piblok geliştirme süreci ilk olarak 2017 yılında Prof. Dr. Abdussamed Aslan, Prof. Dr. Can Elmar Balas ve Arif Uğurlu tarafından başlatılmıştır. Çalışmadaki asıl hedef ülkemizin ilk tek sıra koruma tabakasının geliştirilerek önümüzdeki projelerde kullanılması ve yabancı kökenli tek sıra koruma tabakalarının kullanımı için ödenen yüksek patent ücretinin önüne geçmektir.

Piblok geliştirme sürecinin başlangıcı biyotaklit yöntemi olmuştur. Biyotaklidi yapılan canlı deniz yıldızı olarak seçilmiştir (Ek-2. Şekil). Deniz kıyısından 6.000 m derinliğe kadar olan bölgede yaşayabilen deniz yıldızlarının vücut şekilleri bu derinlikteki basınca dayanabilecek kapasiteye sahiptir. Bu nedenle dalga basıncına karşı koymak için uygun formun deniz yıldızı olduğu belirlenerek fikir çalışmalarına başlanmıştır. Genelde 5 ayaklı şekilde olan deniz yıldızına karşın tasarlanan yapı kilitlenme ve yere temas yüzeyi nedenleri ile 4 ayaklı olarak düşünülmüş ayrıca dalganın dinamik basıncına daha verimli karşı koymak için göğüs bölgesine her iki yönde birer ayak daha eklenerek son şekil verilmiştir.

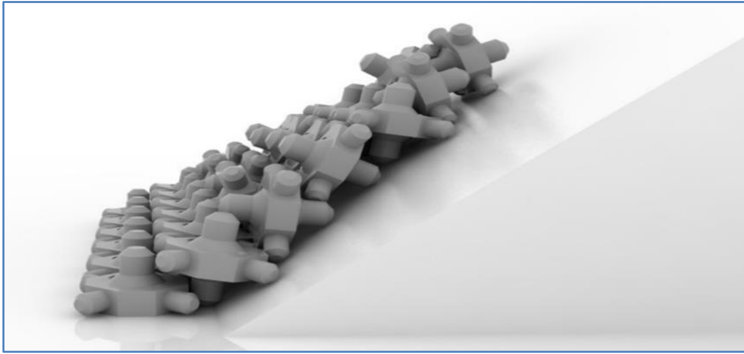
Ek-2. Şekil.1. Değişik şekillere sahip deniz yıldızları

Bu fikir çalışması sonucunda Piblok ailesinin ilk üyesi Türktaş geliştirilmiştir (Ek-2. Şekil). Türktaş ilk olarak parametrik yazılımlarda şekillendirilerek 1/1,33 eğim üzerine yerleştirilmiştir. Türktaş yüzeyinin düzgün olması nedeniyle dalga etkisi altında beton aşınmasının yüksek olabileceği düşünülmüş ve bir sonraki ürün olan Piblok'a geçilmiştir.

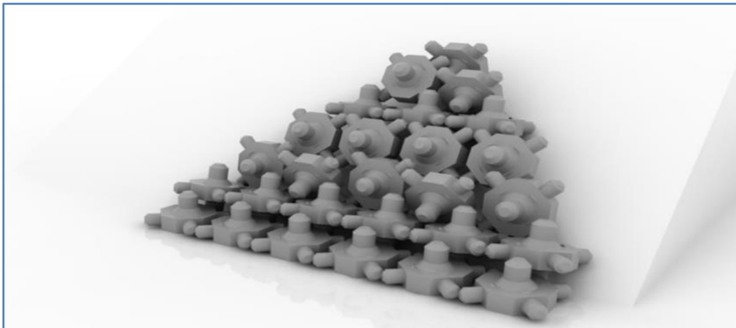
EK-2. (devam) Piblok + geliştirme süreci



Ek-2. Şekil.2. İlk aşamada geliştirilen Türktaş'ın dizilimi

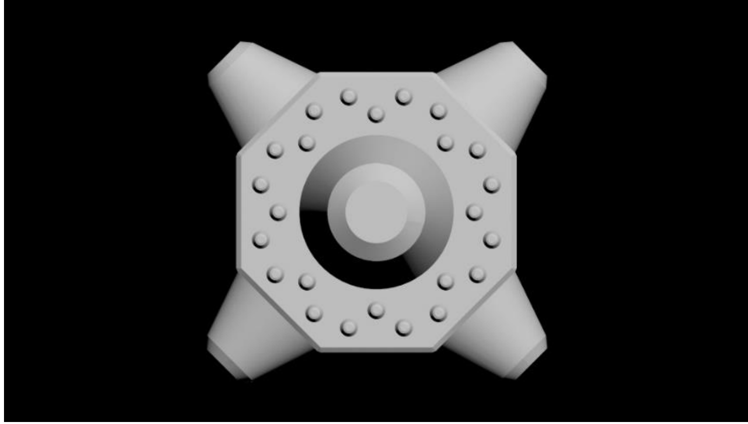


Ek-2. Şekil.3. Türktaş'ın topuk koruması üzerindeki dizilimi

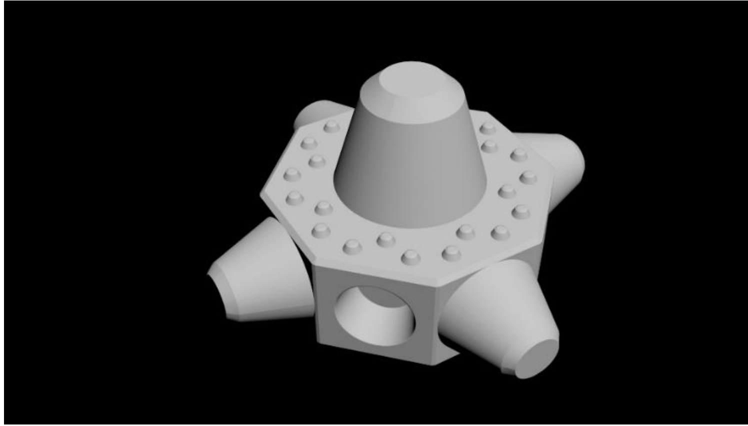


Ek-2. Şekil.4. Arasında görüldüğü üzere Piblok, Türktaş'ta yer almayan yüzey yükseltileri ile sürtünme yüzeyini artırarak dalganın etkisini kırmaya kapasite olarak daha yakındır. Parametrik yazılımlarda yapılan görselleştirme çalışmalarında Piblok'un yerleştirilmesinde de verim elde edilmiş ve 2018/11918 başvuru numarası ile TPE nezdinde tasarım tescili alınmıştır.

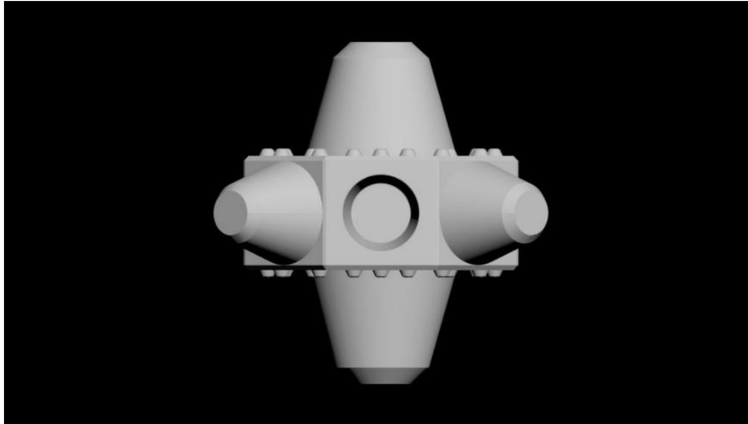
EK-2. (devam) Piblok + geliştirme süreci



Ek-2. Şekil.4. Piblok



Ek-2. Şekil.5. Piblok

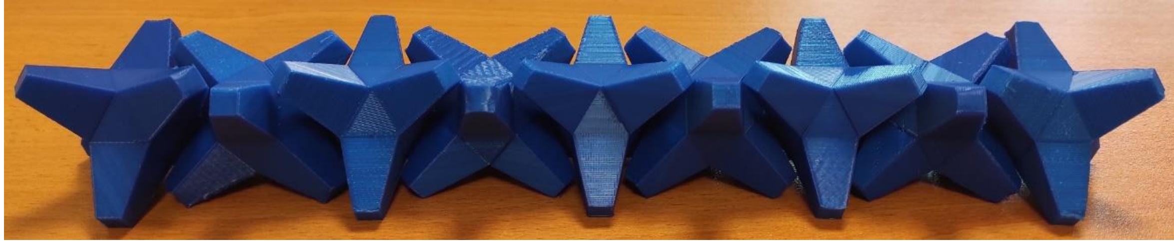


Ek-2. Şekil.6. Piblok

Piblok'un patent süreci olumlu sonuçlanmış, "Sönümleyici Tek Kat Koruma Tabakası TPE: 2023/007643" patent numarası ile ilk patent alınmıştır. Patent sonrası geliştirici ekip, süreç

EK-2. (devam) Piblok + geliştirme süreci

boyunca edindikleri tecrübeleri bir üst seviyeye taşımak için çalışmalarına devam etmiş ve monolitik olarak daha ileri düzey bir ünite çıkarmak için çaba göstermiştir. Piblok+ bu çalışmaların bir sonucu olup Piblok'a oranla daha başarılı kilitlenme kapasitesine sahiptir. Tez kapsamında HAD çalışmaları yapılan Piblok+ benzeri tek sıra koruma tabakaları ile karşılaştırıldığında (Accropode II) aşma, stabilite ve ekonomi yönünden başarılı sonuçlar vermiştir. Piblok+'ın üç boyutlu yazıcıda basılan modelleri Ek-2. Şekil'da görülmektedir. Piblok+ patent başvurusu TPE nezdinde 2022/018635 başvuru numarası ile yapılmış ve 29.01.2024 tarihinde ikinci patenti alması TPE tarafından uygun görülmüştür. 21.02.2024 tarihinde resmi patent bülteninde yayınlanmıştır (Ek-2. Şekil).



Ek-2. Şekil.7. Piblok+

EK-2. (devam) Piblok + geliştirme süreci

2024/2 Resmi Patent Bülteni — Türk Patent ve Marka Kurumu — Yayın Tarihi : 21.02.2024 353

TÜRK [PATENT] TÜRK PATENT VE MARKA KURUMU

(11) **TR 2022 018635 B**

(12) **Patent Belgesi**

(43) Başvuru Yayın Tarihi
2023/01/23, 2023/1 Nolu Bülten

(51) Buluşun tasnif sınıfı
E02B 3/06

(10) Başvuru Yayın No
TR 2022 018635 A2

(21) Başvuru Numarası
2022/018635

(22) Başvuru Tarihi
2022/12/06

(45) Patent Belgesinin Veriliş Tarihi
2024/02/21

(30) Rüçhan Bilgileri (32) (33) (31)

(74) Vekil
İSMAİL ÜSAME YILMAZ (İNNOVASİA DAN. AR-GE PATENT HİZ. TİC. LTD. ŞTİ.)

(73) Patent Sahibi
EDUGLOBE YURTDIŞI AKREDİTASYON EĞİTİM DANIŞMANLIK VE MÜHENDİSLİK LİMİTED ŞİRKETİ
BAHÇELİEVLER MAH. 323/1 CAD. A BLOK- GAZİ ÜNİVERSİTESİ TEKNOKENT BİNASI 10 /50A 22 Gölbaşı Ankara TÜRKİYE
CAN ELMAR BALAS
ABDUSSAMET ARSLAN
ARİF UĞURLU

(72) Buluşu Yapanlar
CAN ELMAR BALAS
ARİF UĞURLU
ABDUSSAMET ARSLAN

(54) Buluş Başlığı
KIYI YAPILARI İÇİN YÜKSEK STABİLİTEYE SAHİP TEK KAT KORUMA TABAKASI

(57) Özet
Buluş, kıyı yapılarının dalgakıranlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve konvansiyonel koruma tabakası malzemelerinden (taş, antifer, tetrapod) daha sağlam bir yapıya sahip tek kat koruma tabakası ile ilgilidir.

Ek-2. Şekil.8. Piblok+'ın patentinin yayınlandığı resmi patent bülteni

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: UĞURLU, Arif
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 30.11.1979, Ankara
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (532) 227 91 80
e-mail	: arifugurlu@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Devam ediyor
Yüksek lisans	ODTÜ / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	2017
Lisans	Erciyes Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı	Şube Müdürü
2008-2011	BUSKİ	Kontrol Mühendisi
2003-2008	ASTA İNŞ. LTD.	Şantiye şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kıyı Yapıları İçin Yüksek Stabiliteye Sahip Tek Kat Koruma Tabakası (TPE: 2022/018635)

2. Sönümleyici Tek Kat Koruma Tabakası (TPE: 2023/007643)

Hobiler

Yürüyüş yapmak

Gazili olmak ayrıcalıktır